

EXPRESS MAIL NO. EV 327 133 499 US

DATE OF DEPOSIT 8/18/03

Our File No. 9281-4631

Client No. N US02078

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of:)
Yukiharu Hayashi)
Serial No. To be Assigned)
Filing Date: Herewith)
For Dual-Type Magnetic Detecting)
Element in Which Free Magnetic)
Layer and Pinned Magnetic Layer)
Have Suitably Selected β Values)

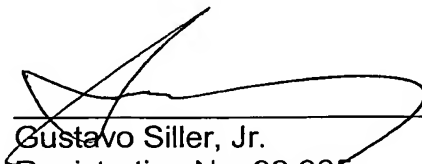
SUBMISSION OF CERTIFIED COPY OF PRIORITY DOCUMENT

Mail Stop Patent Application
Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Dear Sir:

Transmitted herewith is a certified copy of priority document Japanese Patent Application No. 2002-250692, filed August 29, 2002 for the above-named U.S. application.

Respectfully submitted,



Gustavo Siller, Jr.
Registration No. 32,305
Attorney for Applicants

BRINKS HOFER GILSON & LIONE
P.O. BOX 10395
CHICAGO, ILLINOIS 60610
(312) 321-4200

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日
Date of Application:

2002年 8月29日

出 願 番 号
Application Number:

特願2002-250692

[ST.10/C]:

[JP2002-250692]

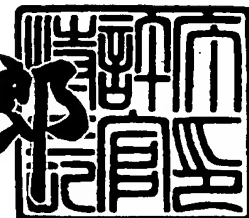
出 願 人
Applicant(s):

アルプス電気株式会社

2003年 3月24日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2003-3019647

【書類名】 特許願

【整理番号】 021135AL

【提出日】 平成14年 8月29日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01L 43/08
G11B 5/39

【発明の名称】 磁気検出素子

【請求項の数】 16

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都大田区雪谷大塚町 1 番 7 号 アルプス電気株式会社
社内

 【氏名】 斎藤 正路

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都大田区雪谷大塚町 1 番 7 号 アルプス電気株式会社
社内

 【氏名】 井出 洋介

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都大田区雪谷大塚町 1 番 7 号 アルプス電気株式会社
社内

 【氏名】 長谷川 直也

【特許出願人】

 【識別番号】 000010098

 【氏名又は名称】 アルプス電気株式会社

 【代表者】 片岡 政隆

【代理人】

 【識別番号】 100085453

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 野▲崎▼ 照夫

【選任した代理人】

【識別番号】 100121049

【弁理士】

【氏名又は名称】 三輪 正義

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 041070

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 磁気検出素子

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第 1 フリー磁性層の上に第 2 フリー磁性層が、非磁性中間層を介して積層されたものであり、

前記第 1 フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 2 フリー磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 1 フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第 2 フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 1 フリー磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 2 フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とする磁気検出素子。

ただし、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である（なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する比抵抗値である）。

【請求項 2】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第 1 フリー磁性層の上に第 2 フリー磁性層が、非磁性中間層を介して積層されたものであり、

前記第 1 フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 2 フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 1 フリー磁性層の β と異なっ

いるか、または、前記第 1 フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 2 フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 1 フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とする磁気検出素子。

ただし、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である（なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する比抵抗値である）。

【請求項 3】 前記第 1 フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、前記第 2 フリー磁性層の膜厚、前記下部非磁性材料層の膜厚、前記上部非磁性材料層の膜厚がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さい請求項 1 または 2 記載の磁気検出素子。

【請求項 4】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第 1 フリー磁性層、非磁性中間層、第 2 フリー磁性層、非磁性中間層、及び第 3 フリー磁性層が順に積層されたものであり、

前記第 1 フリー磁性層、前記第 3 フリー磁性層、及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 2 フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 1 フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第 1 フリー磁性層、前記第 3 フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 2 フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 1 フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とする磁気検出素子。

ただし、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である（なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリ

ティの伝導電子に対する比抵抗値である)。

【請求項5】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第1フリー磁性層、非磁性中間層、第2フリー磁性層、非磁性中間層、及び第3フリー磁性層が順に積層されたものであり、

前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第2フリー磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第1フリー磁性層及び前記第3フリー磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記下部固定磁性層、前記第2フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とする磁気検出素子。

ただし、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である (なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する比抵抗値である)。

【請求項6】 前記第1フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、前記第2フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、及び前記第3フリー磁性層の膜厚並びに、前記下部非磁性材料層の膜厚及び前記上部非磁性材料層の膜厚がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さい請求項4または5記載の磁気検出素子。

【請求項7】 前記第1フリー磁性層、第2フリー磁性層、第3フリー磁性層、下部固定磁性層、または上部固定磁性層と、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の界面における γ の正負の符号が、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しい請求項1ないし6のいずれかに記載の磁気検出素子。

ただし、 γ は、 $r \downarrow / r \uparrow = (1 + \gamma) / (1 - \gamma)$ ($-1 \leq \gamma \leq 1$) の関係

式を満たす界面に固有の値である（なお、 $r \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する界面抵抗値であり、 $r \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する界面抵抗値である）。

【請求項8】 前記非磁性材料層及び／または前記非磁性中間層が、種類の異なる非磁性材料からなる2層構造を有することにより、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の上面と磁性層の界面における γ の正負の符号と、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の下面と磁性層の界面における γ の正負の符号が異なっている請求項7に記載の磁気検出素子。

【請求項9】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第1フリー磁性層の上に第2フリー磁性層が、非磁性中間層を介して積層されたものであり、

NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）をA群に属する合金とし、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）をB群に属する合金としたときに、

前記第1フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であるか、または、前記第2フリー磁性層、前記下部固定磁

性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第1フリー磁性層を形成している磁性材料は前記第2フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であることを特徴とする磁気検出素子。

【請求項10】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第1フリー磁性層の上に第2フリー磁性層が、非磁性中間層を介して積層されたものであり、

NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）をA群に属する合金とし、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）をB群に属する合金としたときに、

前記第1フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であるか、または、前記第1フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であることを特徴とする磁気検出素子。

【請求項 1 1】 前記第 1 フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、前記第 2 フリー磁性層の膜厚、前記下部非磁性材料層の膜厚、前記上部非磁性材料層の膜厚がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さい請求項 9 または 1 0 記載の磁気検出素子。

【請求項 1 2】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第 1 フリー磁性層、非磁性中間層、第 2 フリー磁性層、非磁性中間層、及び第 3 フリー磁性層が順に積層されたものであり、

NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる 1 種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる 1 種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる 1 種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる 1 種の元素である）をA群に属する合金とし、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる 1 種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる 1 種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる 1 種の元素である）をB群に属する合金としたときに、

前記第 1 フリー磁性層、前記第 3 フリー磁性層、及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第 2 フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記第 1 フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であるか、または、前記第 1 フリー磁性層、前記第 3 フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第 2 フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記第 1 フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であることを特徴とする磁気検出素

子。

【請求項13】 フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第1フリー磁性層、非磁性中間層、第2フリー磁性層、非磁性中間層、及び第3フリー磁性層が順に積層されたものであり、

NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）をA群に属する合金とし、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）をB群に属する合金としたときに、

前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層を形成している磁性材料は、前記第1フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であるか、または、前記第1フリー磁性層及び前記第3フリー磁性層を形成している磁性材料は、前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記下部固定磁性層、前記第2フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記第1フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であることを特徴とする磁気検出素子。

【請求項14】 前記第1フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、前記第2フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、及び前記第3フリー磁

性層の膜厚並びに、前記下部非磁性材料層の膜厚及び前記上部非磁性材料層の膜厚がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さい請求項 1 2 または 1 3 記載の磁気検出素子。

【請求項 1 5】 前記下部非磁性材料層、上部非磁性材料層、または前記非磁性中間層のうち少なくとも一つは C u 層と C r 層が積層された積層膜であって、この積層膜が、前記 A 群に属している合金によって形成された磁性層と前記 B 群に属している合金によって形成された磁性層に挟まれている請求項 9 ないし 1 4 のいずれかに記載の磁気検出素子。

【請求項 1 6】 前記下部固定磁性層及び上部固定磁性層は、2 層の磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものである請求項 1 ないし 1 5 のいずれかに記載の磁気検出素子。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、C P P (current perpendicular to the plane) 型の磁気検出素子に係り、特に単位面積当たりの抵抗変化 ($\Delta R \cdot A$) の向上を効果的に図ることが可能な磁気検出素子に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

図 1 4 は、従来の磁気検出素子を示す断面図である。

【0 0 0 3】

このスピバルブ型磁気検出素子は、下から、反強磁性層 2、固定磁性層 3、非磁性材料層 4、第 1 フリー磁性層 5 a、非磁性中間層 5 b、第 2 フリー磁性層 5 c からなるシンセティックフェリ型のフリー磁性層 5、非磁性材料層 6、固定磁性層 7、反強磁性層 8 から構成された多層膜 9、多層膜 9 の下と上に形成された電極層 1 及び電極層 1 0 と、フリー磁性層 5 の両側部に形成されたハードバイアス層 1 1、1 1 及びハードバイアス層 1 1、1 1 の上下に形成された絶縁層 1 2、1 2 並びに絶縁層 1 3、1 3 からなっている。

【0 0 0 4】

反強磁性層 2、8 は PtMn、固定磁性層 3、7、及びフリー磁性層 5 の第 1 フリー磁性層 5 a、第 2 フリー磁性層 5 c は CoFe、フリー磁性層 5 の非磁性中間層 5 b は Ru、非磁性材料層 4、6 は Cu、ハードバイアス層 11 は CoPt などの硬磁性材料、絶縁層 12、13 はアルミナ、電極層 1、10 は Cr などの導電性材料によって形成されている。

【0005】

図 14 に示す磁気検出素子は、フリー磁性層 5 の上下のそれぞれに非磁性材料層 4、固定磁性層 3、及び非磁性材料層 6、固定磁性層 7 が形成されているデュアルスピナルバルブ型磁気検出素子と呼ばれるものであり、ハードディスクなどの記録媒体からの記録磁界を検出するものである。

【0006】

なお、図 14 に示される磁気検出素子は、多層膜 9 の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる CPP (current perpendicular to the plane) 型の磁気検出素子である。

【0007】

固定磁性層 3 の磁化方向は図示 Y 方向に固定され、固定磁性層 7 の磁化方向は図示 Y 方向と反平行方向に固定されている。例えば、第 2 フリー磁性層 5 c の磁氣的膜厚 (飽和磁化 $M_s \times$ 膜厚 t) が第 1 フリー磁性層 5 a の磁氣的膜厚よりも大きいとき、外部磁界が印加されていない状態の第 2 フリー磁性層 5 c の磁化方向は、ハードバイアス層 11、11 からの縦バイアス磁界によってトラック幅方向 (図示 X 方向) に向けられて単磁区化し、第 1 フリー磁性層 5 a の磁化方向はトラック幅方向に反平行な方向に向けられる。フリー磁性層 5 全体の磁化方向は、磁氣的膜厚の大きい第 2 フリー磁性層 5 c の磁化方向になる。外部磁界が印加されると第 1 フリー磁性層 5 a と第 2 フリー磁性層 5 c の磁化が人工フェリ状態を維持したまま回転し、多層膜 9 の電気抵抗が変化する。この電気抵抗の変化を電圧変化または電流変化として取り出すことにより外部磁界を検出する。

【0008】

磁性材料に電流を流すと、この磁性材料中では、メジャーリティの伝導電子に対する比抵抗とマイノリティの伝導電子に対する比抵抗が異なる値になる。

【0009】

磁性材料を構成する磁性原子は、主に3d軌道または4f軌道の電子の軌道磁気モーメント及びスピン磁気モーメントによって、その磁気モーメントが規定される。磁性原子の3d軌道または4f軌道に存在する電子は、基本的にアップスピンとダウンスピンの数が異なっている。この3d軌道または4f軌道に存在するアップスピンの電子とダウンスピンの電子のうち数が多い方の電子のスピンをメジャーリティスピンといい、少ない方の電子のスピンをマイノリティスピンという。

【0010】

一方、磁性材料を流れる電流中には、アップスピンの伝導電子とダウンスピンの伝導電子がほぼ同数含まれている。アップスピンの伝導電子とダウンスピンの伝導電子のうち、磁性材料のメジャーリティスピンと同じスピンを有する方をメジャーリティの伝導電子といい、磁性材料のマイノリティスピンと同じスピンを有する方をマイノリティの伝導電子という。

【0011】

ここで $\rho \downarrow$ をマイノリティの伝導電子に対する磁性材料の比抵抗値とし、 $\rho \uparrow$ をメジャーリティの伝導電子に対する比抵抗値とすると以下に示す関係式によって、磁性材料に固有の値 β を定義できる。

【0012】

$$\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta) \quad (-1 \leq \beta \leq 1)$$

すなわち、磁性材料の β の値が正($\beta > 0$)のとき、 $\rho \downarrow > \rho \uparrow$ となり、磁性材料中を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子の方になる。一方、磁性材料の β の値が負($\beta < 0$)のとき、 $\rho \downarrow < \rho \uparrow$ となり、磁性材料中を流れやすいのはマイノリティの伝導電子の方になる。

【0013】

また、磁性材料からなる磁性層に非磁性材料からなる非磁性層が積層されると、磁性層と非磁性層の界面に界面抵抗が発生する。

【0014】

この界面抵抗も、メジャーリティの伝導電子に対する値とマイノリティの伝導

電子に対する値が異なる。

【0015】

$r \downarrow$ をマイノリティの伝導電子に対する界面抵抗値とし、 $r \uparrow$ を伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する界面抵抗値とすると以下に示す関係式によって、磁性材料と非磁性材料の組み合わせに固有の値 γ を定義できる。

【0016】

$$r \downarrow / r \uparrow = (1 + \gamma) / (1 - \gamma) \quad (-1 \leq \gamma \leq 1)$$

すなわち、 γ の値が正 ($\gamma > 0$) のとき、 $r \downarrow > r \uparrow$ となり、界面を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子の方になる。一方、 γ の値が負 ($\gamma < 0$) のとき、 $r \downarrow < r \uparrow$ となり、界面を流れやすいのはマイノリティの伝導電子の方になる。

【0017】

図14に示される磁気検出素子は、固定磁性層2、第1フリー磁性層5a、第2フリー磁性層5c、固定磁性層7がすべて同じ組成の磁性材料CoFeによって形成されている。CoFeの β は正の値を示す。すなわち、固定磁性層2、第1フリー磁性層5a、第2フリー磁性層5c、及び固定磁性層7中を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子である。

【0018】

また、非磁性材料層4及び非磁性材料層6は両方ともCuによって形成されている。このとき、非磁性材料層4と固定磁性層3の界面の γ の値、非磁性材料層4と第1フリー磁性層5aの界面の γ の値、非磁性材料層6と第2フリー磁性層5cの界面の γ の値、非磁性材料層6と固定磁性層7の界面の γ の値は、全て正の値を示す。

【0019】

非磁性中間層5bはRuによって形成されている。このとき、第1フリー磁性層5aと非磁性中間層5bの界面の γ の値と第2フリー磁性層5cと非磁性中間層5bの界面の γ の値は、両方とも負の値を示す。

【0020】

各磁性層と β と γ の値の関係を図15にまとめる。図15には、図14に示さ

れた磁気検出素子の磁気抵抗効果に関係ある層を模式的に示している。固定磁性層 3、第 1 フリー磁性層 5 a、第 2 フリー磁性層 5 c、及び固定磁性層 7 に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。ここで、磁化が図示右方向（Y 方向）を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第 1 フリー磁性層 5 a と第 2 フリー磁性層 5 c の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0021】

【発明が解決しようとする課題】

磁気検出素子の抵抗変化 ΔR を大きくするためには、フリー磁性層 5 の磁化方向が図 15 に示される方向を向いているときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（非磁性材料層 4、6 及び非磁性中間層 5 b）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さいことが好ましい（または、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（非磁性材料層 4、6 及び非磁性中間層 5 b）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さいことが好ましい）。

【0022】

しかし、図 15 をみると、メジャーリティスピンがアップスピンであり $\beta > 0$ である固定磁性層 3 及び第 1 フリー磁性層 5 a は、アップスピンの伝導電子に対する抵抗値が小さくなっているが、メジャーリティスピンがダウンスピンであり、 $\beta > 0$ である第 2 フリー磁性層 5 c 及び固定磁性層 7 はアップスピンの伝導電子に対する抵抗値が大きくなっている。

【0023】

また、非磁性材料層 4 と固定磁性層 3 の界面、非磁性材料層 4 と第 1 フリー磁

性層 5 a の界面、第 2 フリー磁性層 5 c と非磁性中間層 5 b の界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗は、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗よりも小さくなっている。しかし、第 1 フリー磁性層 5 a と非磁性中間層 5 b の界面、非磁性材料層 6 と第 2 フリー磁性層 5 c の界面、非磁性材料層 6 と固定磁性層 7 の界面におけるアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗は、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗よりも大きくなっている。

【 0 0 2 4 】

このように、従来の磁気検出素子は、伝導電子の流れ方の制御の効率が低いものであった。

【 0 0 2 5 】

本発明は、上記従来の課題を解決するためのものであり、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることによって、単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる磁気検出素子を提供することを目的としている。

【 0 0 2 6 】

【課題を解決するための手段】

本発明は、フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第 1 フリー磁性層の上に第 2 フリー磁性層が、非磁性中間層を介して積層されたものであり、

前記第 1 フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 2 フリー磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 1 フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第 2 フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第 1 フリー磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第 2 フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とするものである。

【0027】

ただし、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である（なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する比抵抗値である）。

【0028】

本発明のように、前記第1フリー磁性層、前記第2フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層（以下これらをまとめて呼ぶときは単に磁性層と呼ぶ）それぞれを形成する磁性材料の β を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに平行になる方向に固定されているデュアルスピバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0029】

または、本発明の磁気検出素子は、前記第1フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第2フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第1フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第2フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とするものである。

【0030】

本発明のように、各磁性層を形成する磁性材料の β を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに反平行になる方向に固定されているデュアルスピバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるよ

うにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【 0 0 3 1 】

あるいは、本発明は、前記フリー磁性層が、第1フリー磁性層、非磁性中間層、第2フリー磁性層、非磁性中間層、及び第3フリー磁性層が順に積層されたものであり、

前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第2フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第2フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とするものである。

【 0 0 3 2 】

本発明のように、前記第1フリー磁性層、前記第2フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層（以下これらをまとめて呼ぶときは単に磁性層と呼ぶ）それぞれを形成する磁性材料の β を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに平行になる方向に固定されているデュアルスピバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【 0 0 3 3 】

または、本発明の磁気検出素子は、前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記第2フリー磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっているか、または、前記第1フリー磁性層及び前記第3フリー磁性層を形成している磁性材料の β は正負の符号が同じものであり、前記下部固定磁性層、前記第2フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料の β の正負の符号は前記第1フリー磁性層の β と異なっていることを特徴とするものである。

【0034】

本発明のように、各磁性層を形成する磁性材料の β を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに反平行になる方向に固定されているデュアルスピバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0035】

さらに、本発明では、前記第1フリー磁性層、第2フリー磁性層、第3フリー磁性層、下部固定磁性層、または上部固定磁性層と、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の界面における γ の正負の符号が、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しいことが好ましい。

【0036】

ただし、 γ は、 $r \downarrow / r \uparrow = (1 + \gamma) / (1 - \gamma)$ ($-1 \leq \gamma \leq 1$) の関係式を満たす界面に固有の値である（なお、 $r \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する界面抵抗値であり、 $r \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する界面抵抗値である）。

【0037】

本発明のように、 γ を規定すると、デュアルスピバルブ型磁気検出素子にお

いて、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（非磁性材料層及び非磁性中間層）の界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなるか、または、全ての前記界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0038】

なお、上記のように γ を規定するためには、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の上面と磁性層の界面における γ の正負の符号と、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の下面と磁性層の界面における γ の正負の符号を異ならせることが必要になる場合があるが、本発明では、前記非磁性材料層及び／または前記非磁性中間層を、種類の異なる非磁性材料からなる2層構造とすることによってそのような問題を解決できる。

【0039】

または、本発明は、フリー磁性層の下に下部非磁性材料層、下部固定磁性層、及び下部反強磁性層が積層され、前記フリー磁性層の上に上部非磁性材料層、上部固定磁性層、及び上部反強磁性層が積層されている多層膜を有し、前記多層膜の各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子において、

前記フリー磁性層は、第1フリー磁性層の上に第2フリー磁性層が、非磁性中間層を介して積層されたものであり、

NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）をA群に属する合金とし、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo

、I r、O s、R e、Wから選ばれる1種の元素である)、またはF e A合金(ただし、AはM n、C r、V、T i、R u、M o、O s、R e、Wから選ばれる1種の元素である)をB群に属する合金としたときに、

前記第1フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であるか、または、前記第2フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第1フリー磁性層を形成している磁性材料は前記第2フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であることを特徴とするものである。

【0040】

本発明のように、各磁性層を形成する磁性材料を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに平行になる方向に固定されているデュアルスピンバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0041】

または、本発明の磁気検出素子は、前記第1フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であるか、または、前記第1フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群と異なる群に属する合金であることを特徴とするものである。

【 0 0 4 2 】

本発明のように、各磁性層を形成する磁性材料を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに反平行になる方向に固定されているデュアルスピバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【 0 0 4 3 】

または、本発明は、前記フリー磁性層は、第1フリー磁性層、非磁性中間層、第2フリー磁性層、非磁性中間層、及び第3フリー磁性層が順に積層されたものであり、

前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記第1フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であるか、または、前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層及び前記下部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記第1フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であることを特徴とするものである。

【 0 0 4 4 】

本発明のように、前記第1フリー磁性層、前記第2フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層（以下これらをまとめて呼ぶときは単に磁性層と呼ぶ）それぞれを形成する磁性材料を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに平行になる方向に固定されているデュアルスピバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップ

スピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0045】

または、本発明の磁気検出素子は、前記第1フリー磁性層、前記第3フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記第2フリー磁性層を形成している磁性材料は、前記第1フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であるか、または、前記第1フリー磁性層及び前記第3フリー磁性層を形成している磁性材料は、前記A群またはB群のうち同じ群に属する合金であり、前記下部固定磁性層、前記第2フリー磁性層、及び前記上部固定磁性層を形成している磁性材料は、前記第1フリー磁性層が属する群とは異なる群に属する合金であることを特徴とするものである。

【0046】

本発明のように、各磁性層を形成する磁性材料を規定すると、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層の磁化が、互いに反平行になる方向に固定されているデュアルスピンバルブ型磁気検出素子において、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0047】

さらに、本発明では、前記下部非磁性材料層、上部非磁性材料層、または前記非磁性中間層のうち少なくとも一つはCu層とCr層が積層された積層膜であって、この積層膜が、前記A群に属している合金によって形成された磁性層と前記B群に属している合金によって形成された磁性層に挟まれることにより、全ての界面においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子

に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての界面においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0048】

本発明では、前記第1フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、前記第2フリー磁性層の膜厚、前記下部非磁性材料層の膜厚、前記上部非磁性材料層の膜厚がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピンの拡散長より小さくとも、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0049】

前記第1フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、前記第2フリー磁性層の膜厚、前記非磁性中間層の膜厚、及び前記第3フリー磁性層の膜厚並びに、前記下部非磁性材料層の膜厚及び前記上部非磁性材料層の膜厚がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピンの拡散長より小さくとも、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0050】

なお、本発明では、前記下部固定磁性層及び上部固定磁性層は、2層の磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものであることが好ましい。

【0051】

【発明の実施の形態】

図1は本発明における第1実施形態の磁気検出素子の構造を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。

【0052】

図1に示す磁気検出素子は、いわゆるデュアル型のスピバルブ型薄膜素子である。

【0053】

第1の電極層20の中央上面には、下から下地層21、シード層22、下部反強磁性層23、磁性層50と52とその間に形成されたRuなどの非磁性中間層

51からなる3層フェリ構造の下部固定磁性層24、下部非磁性材料層25及びフリー磁性層26が形成されている。フリー磁性層26は、第1フリー磁性層53と第2フリー磁性層55とその間に形成された非磁性中間層54からなる3層フェリ構造である。さらにフリー磁性層26の上面に上部非磁性材料層27、磁性層60と62とその間に形成されたRuなどの非磁性中間層61からなる3層フェリ構造の上部固定磁性層28、上部反強磁性層29、及び第2の電極層30が順次積層されている。

【0054】

また、図1に示すように、下地層21から上部反強磁性層29までの多層膜T1のトラック幅方向（図示X方向）における両側領域には、絶縁層31、31、バイアス下地層32、32、ハードバイアス層33、33、絶縁層34、34が順次積層形成されている。

【0055】

第1の電極層20は、例えば α -Ta、Au、Cr、Cu（銅）やW（タングステン）などで形成されている。下地層21は、Ta、Hf、Nb、Zr、Ti、Mo、Wのうち少なくとも1種以上で形成されることが好ましい。下地層21は50Å以下程度の膜厚で形成される。ただし、この下地層21は形成されていなくても良い。

【0056】

シード層22は、主として面心立方晶から成り、次に説明する下部反強磁性層23との界面と平行な方向に(111)面が優先配向されている。シード層22は、Cr、NiFe合金、あるいはNi-Fe-Y合金（ただしYは、Cr、Rh、Ta、Hf、Nb、Zr、Tiから選ばれる少なくとも1種以上）で形成されることが好ましい。これらの材質で形成されたシード層22はTa等で形成された下地層21上に形成されることにより下部反強磁性層23との界面と平行な方向に(111)面が優先配向しやすくなる。シード層22は、例えば30Å程度で形成される。

【0057】

なお本発明における磁気検出素子は各層の膜面と垂直方向にセンス電流が流れ

るCPP型であるため、シード層22にも適切にセンス電流が流れる必要性がある。よってシード層22は比抵抗の高い材質でないことが好ましい。すなわちCPP型ではシード層22はNiFe合金などの比抵抗の低い材質で形成されることが好ましい。ただし、シード層22は形成されなくても良い。

【0058】

下部反強磁性層23及び上部反強磁性層29は、元素X（ただしXは、Pt, Pd, Ir, Rh, Ru, Osのうち1種または2種以上の元素である）とMnとを含有する反強磁性材料で形成されることが好ましい。あるいは下部反強磁性層23及び上部反強磁性層29は、元素Xと元素X'（ただし元素X'は、Ne, Ar, Kr, Xe, Be, B, C, N, Mg, Al, Si, P, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Hf, Ta, W, Re, Au, Pb、及び希土類元素のうち1種または2種以上の元素である）とMnを含有する反強磁性材料により形成されることが好ましい。

【0059】

これらの反強磁性材料は、耐食性に優れしかもブロッキング温度も高く次に説明する下部固定磁性層24または上部固定磁性層28との界面で大きな交換異方性磁界を発生し得る。また下部反強磁性層23及び上部反強磁性層29は80Å以上で300Å以下、例えば200Åの膜厚で形成されることが好ましい。

【0060】

この実施形態では下部固定磁性層24及び上部固定磁性層28は3層のフェリ構造で形成されている。

【0061】

下部固定磁性層24を構成する符号50及び52の層は磁性層である。磁性層50、52間には非磁性材料によって形成された非磁性中間層51が介在している。同様に、上部固定磁性層28の磁性層60及び62の間には、非磁性材料によって形成された非磁性中間層51が介在している。

【0062】

下部固定磁性層24、上部固定磁性層28の材料については後述する。

下部反強磁性層 2 3 と磁性層 5 0 の間及び上部反強磁性層 2 9 と磁性層 6 2 の間には、交換異方性磁界が発生している。

【 0 0 6 3 】

例えば磁性層 5 0 の磁化がハイト方向（図示 Y 方向）と逆方向に固定された場合、もう一方の磁性層 5 2 は R K K Y 相互作用により、ハイト方向に磁化され固定される。また、磁性層 6 2 の磁化がハイト方向と逆方向に固定された場合、もう一方の磁性層 6 0 は R K K Y 相互作用により、ハイト方向に磁化され固定される。

【 0 0 6 4 】

この構成により下部固定磁性層 2 4 及び上部固定磁性層 2 8 の磁化を安定した状態にでき、また下部固定磁性層 2 4 及び上部固定磁性層 2 8 の磁化方向を強固に固定できる。

【 0 0 6 5 】

例えば、磁性層 5 0、5 2 及び磁性層 6 0、6 2 の膜厚はそれぞれ 1 0 ～ 7 0 Å 程度で形成される。また非磁性中間層 5 1 及び非磁性中間層 6 1 の膜厚は 3 Å ～ 1 0 Å 程度で形成される。

【 0 0 6 6 】

なお下部固定磁性層 2 4、上部固定磁性層 2 8 はフェリ構造ではなく単層膜あるいは磁性層だけの積層膜で形成されていても良い。

【 0 0 6 7 】

下部非磁性材料層 2 5 及び上部非磁性材料層 2 7 は電気抵抗の低い導電性材料によって形成される。下部非磁性材料層 2 5 及び上部非磁性材料層 2 7 は例えば 2 5 Å 程度の膜厚で形成される。下部非磁性材料層 2 5 及び上部非磁性材料層 2 7 の材料については後述する。

【 0 0 6 8 】

フリー磁性層 2 6 は、第 1 フリー磁性層 5 3 と第 2 フリー磁性層 5 5 とその間に形成された非磁性中間層 5 4 からなる 3 層フェリ構造である。

【 0 0 6 9 】

第 1 フリー磁性層 5 3 と第 2 フリー磁性層 5 5 は磁性材料からなり、非磁性中

間層 5 4 は非磁性材料からなる。トラック幅方向（図示 X 方向）に磁化されているハードバイアス層 3 3，3 3 からの縦バイアス磁界によって、第 1 フリー磁性層 5 3 と第 2 フリー磁性層 5 5 のうち、磁氣的膜厚（単位面積当たりの磁気モーメント；飽和磁束密度 $M_s \times$ 膜厚 t ）の大きい方の磁化が図示 X 方向に揃えられ、他方の磁化は図示 X 方向と反平行方向を向く。

【0070】

例えば、図 1 では、第 2 フリー磁性層 5 5 の磁氣的膜厚の方が、第 1 フリー磁性層 5 3 の磁氣的膜厚より大きくなっているため、第 2 フリー磁性層 5 5 の磁化が図示 X 方向にそろえられる。そして、RKKY 相互作用によって、第 1 フリー磁性層 5 3 の磁化方向が図示 X 方向と反平行方向に向けられる。

【0071】

フリー磁性層 2 6 の合計の磁氣的膜厚は、第 1 フリー磁性層 5 3 の磁氣的膜厚と第 2 フリー磁性層 5 5 の磁氣的膜厚の差になる。従って、本実施の形態のような人工フェリ型のフリー磁性層 2 6 であれば、第 1 フリー磁性層 5 3 と第 2 フリー磁性層 5 5 を安定して成膜できる膜厚で形成しても、フリー磁性層 2 6 の実質的な磁氣的膜厚を減少させることができ、磁気検出素子の磁界検出感度を向上させることができる。

【0072】

第 1 フリー磁性層 5 3、第 2 フリー磁性層 5 5、非磁性材料層 5 4 の材料及び膜厚については後述する。

【0073】

図 1 に示すように、多層膜 T 1 のトラック幅方向の両側領域の第 1 の電極層 2 0 上には、絶縁層 3 1，3 1 が形成されている。絶縁層 3 1，3 1 は例えば Al_2O_3 、 SiO_2 など一般的な絶縁材料で形成される。

【0074】

絶縁層 3 1，3 1 の上面 3 1 a，3 1 a は、フリー磁性層 2 6 の下面 2 6 a よりも図示下側（図示 Z 方向とは逆方向）に形成されていることが好ましい。

【0075】

絶縁層 3 1，3 1 の上には、バイアス下地層 3 2，3 2 が形成されている。ま

たバイアス下地層32, 32の上にはハードバイアス層33, 33が形成されている。ハードバイアス層33, 33は、フリー磁性層26の両側端面26b, 26bに対向する位置に形成される。ハードバイアス層33, 33は、トラック幅方向(図示X方向)に磁化されている。

【0076】

バイアス下地層32, 32はハードバイアス層33, 33の特性(保磁力 H_c 、角形比 S)を向上させるために設けられたものである。

【0077】

本発明では、バイアス下地層32, 32は、結晶構造が体心立方構造(bcc 構造)の金属膜で形成されることが好ましい。なおこのときバイアス下地層32, 32の結晶配向は(100)面が優先配向するのが好ましい。

【0078】

またハードバイアス層33, 33は、 $CoPt$ 合金や $CoPtCr$ 合金などで形成される。これら合金の結晶構造は、稠密六方構造(hcp)単相あるいは面心立方構造(fcc)と稠密六方構造(hcp)の混相となっている。

【0079】

ここで上記の金属膜で形成されたバイアス下地層32, 32とハードバイアス層33, 33を構成する $CoPt$ 系合金の hcp 構造の界面での原子配列が近くなるために、 $CoPt$ 系合金は fcc 構造を形成しづらく hcp 構造で形成されやすくなる。このとき hcp 構造の c 軸は $CoPt$ 系合金とバイアス下地層の境界面内に優先配向される。 hcp 構造は fcc 構造に比べて c 軸方向に大きな磁気異方性を生じるため、ハードバイアス層33, 33に磁界を与えたときの保磁力 H_c は大きくなるのである。さらに hcp の c 軸は $CoPt$ 系合金とバイアス下地層との境界面内で優先配向となっているため、残留磁化が増大し、残留磁化/飽和磁束密度で求められる角形比 S は大きくなる。その結果、ハードバイアス層33, 33の特性を向上させることができ、ハードバイアス層33, 33から発生するバイアス磁界を増大させることができる。結晶構造が体心立方構造(bcc 構造)の金属膜は、 Cr , W , Mo , V , Mn , Nb , Ta のいずれか1種または2種以上の元素で形成されることが好ましい。

【0080】

また、バイアス下地層32はハードバイアス層33、33の下側にのみ形成されていることが好ましいが、フリー磁性層26の両側端面26b、26bとハードバイアス層33、33間にも若干介在してもよい。フリー磁性層26の両側端面26b、26bとハードバイアス層33、33間に形成されるバイアス下地層32、32のトラック幅方向（図示X方向）における膜厚は1nm以下であることが好ましい。

【0081】

これによりハードバイアス層33、33とフリー磁性層26とを磁氣的に連続体にでき、フリー磁性層26の端部が反磁界の影響を受けるバックリング現象などの問題も発生せず、フリー磁性層26の磁区制御を容易にできる。

【0082】

図1の磁気検出素子は、ハードバイアス層33、33によって、フリー磁性層26の第1フリー磁性層53及び第2フリー磁性層55が単磁区化されるものであるが、本実施の形態のように第1フリー磁性層53と第2フリー磁性層55の磁化方向が互いに反平行方向を向くものであるときは、ハードバイアス層33、33の内側端面33a、33aが、第1フリー磁性層53及び第2フリー磁性層55のいずれか一方の端部とのみ対向していることが好ましい。図1では、ハードバイアス層33、33の内側端面33a、33aが第2フリー磁性層55の端部55a、55aにのみ対向している。これによって、ハードバイアス層33、33から供給されるトラック幅方向（図示X方向）の縦バイアス磁界は第2フリー磁性層55にのみ直接作用し、トラック幅方向と反平行方向の磁化を有する第1フリー磁性層53の磁化に乱れが生じることを抑制または防止できる。

【0083】

また図1に示すように、ハードバイアス層33、33の上には絶縁層34、34が形成されている。絶縁層34、34は、 Al_2O_3 や SiO_2 などの一般的な絶縁材料で形成される。なおこの実施形態では、絶縁層34、34の上面と上部反強磁性層29の上面とが連続面となっている。

【0084】

絶縁層 34、34 及び上部反強磁性層 29 の上には、第 2 の電極層 30 が形成されている。

【0085】

この実施形態では、第 2 の電極層 30 から第 1 の電極層 20 に向けてセンス電流が流れるが、第 1 の電極層 20 から第 2 の電極層 30 に向けてセンス電流が流れても良い。従ってセンス電流は、磁気検出素子の各層を膜面と垂直方向に流れ、このようなセンス電流の流れ方向は CPP 型と呼ばれる。

【0086】

上部固定磁性層 28、上部非磁性材料層 27、フリー磁性層 26、下部非磁性材料層 25 及び下部固定磁性層 24 に検出電流（センス電流）が与えられ、走行方向が Z 方向であるハードディスクなどの記録媒体からの洩れ磁界が Y 方向に与えられると、フリー磁性層 26 の磁化が図示 X 方向から Y 方向へ向けて変化する。第 1 フリー磁性層 53 の磁化方向と下部固定磁性層 24 の磁性層 52 の磁化方向の関係、及び第 2 フリー磁性層 55 と上部固定磁性層 28 の磁性層 60 の磁化方向の関係で電気抵抗が変化し（これを磁気抵抗効果という）、この電気抵抗値の変化に基づく電圧変化または電流変化により、記録媒体からの洩れ磁界が検出される。

【0087】

図 1 に示される磁気検出素子は、下地層 21、シード層 22、下部反強磁性層 23、下部固定磁性層 24、下部非磁性材料層 25、フリー磁性層 26、上部非磁性材料層 27、上部固定磁性層 28、上部反強磁性層 29 からなる多層膜 T1 のトラック幅方向（図示 X 方向）の両側端面 S1、S1 が連続した傾斜面となっている。

【0088】

図 1 に示された磁気検出素子の特徴部分について説明する。

本実施の形態の磁気検出素子は、下部固定磁性層 24、下部非磁性材料層 25、フリー磁性層 26、上部非磁性材料層 27、及び上部固定磁性層 28 を形成する材料を本発明特有の規定に基づいて適切に選択することによって、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を向上させるものである。

【0089】

図1に示される磁気検出素子の下部固定磁性層24、フリー磁性層26、及び上部固定磁性層28の材料は以下に示すとおりである。

【0090】

ケース1. 第1フリー磁性層53、下部固定磁性層24の磁性層52、上部固定磁性層の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、TはFe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

第2フリー磁性層55は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0091】

下部非磁性材料層25はCuからなる。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCu、第2層71はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27も第1層72と第2層73の積層体であって、第1層72はCr、第2層71はCuによって形成されている。

【0092】

ケース2. 第1フリー磁性層53、下部固定磁性層24の磁性層52、上部固定磁性層の磁性層60は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、

Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第2フリー磁性層55は、NiX合金(ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である)、CoT合金(ただし、TはFe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である)、FeZ合金(ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-Mn-D合金(ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0093】

下部非磁性材料層25はCrからなる。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCr、第2層71はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27も第1層72と第2層73の積層体であって、第1層72はCu、第2層71はCrによって形成されている。

【0094】

下部固定磁性層24の磁性層50は磁性層52と同じ材料で、上部固定磁性層28の磁性層62は磁性層60と同じ材料で形成されている。

【0095】

上記のNiX合金、CoT合金、FeZ合金、またはCo-Mn-D合金をA群に属する合金とし、NiM合金、CoQ合金、FeA合金をB群に属する合金とすると、A群に属する合金は $\beta > 0$ である磁性材料であり、B群に属する合金は $\beta < 0$ である磁性材料である。NiX合金の具体的組成として例えばNi₈₀Fe₂₀を、FeA合金の具体的組成として例えばFe₉₀Cr₁₀をあげることができる。

【0096】

なお、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である(なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する比抵抗値である)。すなわち、磁性材料の β の値が正($\beta >$

0) のとき、 $\rho \downarrow > \rho \uparrow$ となり、磁性材料中を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子の方になる。一方、磁性材料の β の値が負 ($\beta < 0$) のとき、 $\rho \downarrow < \rho \uparrow$ となり、磁性材料中を流れやすいのはマイノリティの伝導電子の方になる。

【0097】

また、下部固定磁性層 24 の磁性層 52 と下部非磁性材料層 25 との界面、下部非磁性材料層 25 と第 1 フリー磁性層 53 の界面、第 1 フリー磁性層 53 と非磁性中間層 54 との界面、非磁性中間層 54 と第 2 フリー磁性層 55 の界面、第 2 フリー磁性層 55 と上部非磁性材料層 27、上部非磁性材料層 27 と上部固定磁性層 28 の磁性層 60 の界面における γ の正負の符号が、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しくなっている。

【0098】

なお、 γ は、 $r \downarrow / r \uparrow = (1 + \gamma) / (1 - \gamma)$ ($-1 \leq \gamma \leq 1$) の関係式を満たす界面に固有の値である（なお、 $r \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する界面抵抗値であり、 $r \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する界面抵抗値である）。すなわち、 γ の値が正 ($\gamma > 0$) のとき、 $r \downarrow > r \uparrow$ となり、界面を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子の方になる。一方、 γ の値が負 ($\gamma < 0$) のとき、 $r \downarrow < r \uparrow$ となり、界面を流れやすいのはマイノリティの伝導電子の方になる。

【0099】

導電性材料の中を電流が流れるとき、伝導電子はある距離だけ進むとスピンの向きが変化する。導電性材料の中を伝導電子がスピンを変えずに進む距離をスピン拡散長 (Spin Diffusion Length) という。スピン拡散長は導電性材料によって特有の値を示す。

【0100】

本実施の形態では、第 1 フリー磁性層 53 の膜厚 t_1 、非磁性中間層 54 の膜厚 t_2 、第 2 フリー磁性層 55 の膜厚 t_3 、下部非磁性材料層 25 の膜厚 t_4 、上部非磁性材料層 27 の膜厚 t_5 がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さくなっている。

【0101】

従って、磁気抵抗効果に關与する伝導電子が例えばアップスピンの伝導電子のとき、このアップスピンの伝導電子は、スピンの方向の同一性を保持したまま上部非磁性材料層 27、第1フリー磁性層 53、非磁性中間層 54、第2フリー磁性層 55、下部非磁性材料層 25を流れることになる。

【0102】

例えば、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ のスピンの拡散長は150 Å、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ のスピンの拡散長は120 Å、 $\text{Ni}_{97}\text{Cr}_3$ のスピンの拡散長は50 Å、 $\text{Fe}_{95}\text{Cr}_5$ のスピンの拡散長は90 Å、 $\text{Fe}_{80}\text{Cr}_{20}$ のスピンの拡散長は40 Å、Cuのスピンの拡散長は1000 Å、Crのスピンの拡散長は100 Åである。

【0103】

ケース1及びケース2の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の關係を図2にまとめる。図2には、図1に示された磁気検出素子の磁気抵抗効果に關係ある層を模式的に示している。下部固定磁性層 24の磁性層 52、第1フリー磁性層 53、第2フリー磁性層 55、及び固定磁性層 28の磁性層 60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。ここで、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に關わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に關わる電子のメジャーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層 53と第2フリー磁性層 55の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0104】

図2をみると、ケース1の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層 25、非磁性中間層 54、上部非磁性材料層 27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0105】

また、ケース2の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンス

ピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0106】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0107】

また、下部固定磁性層24、下部非磁性材料層25、フリー磁性層26、上部非磁性材料層27、及び上部固定磁性層28を以下に示す材料の組み合わせで形成してもよい。

【0108】

ケース3．第2フリー磁性層55、下部固定磁性層24の磁性層52、上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

第1フリー磁性層53は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0109】

下部非磁性材料層25は第1層74と第2層75の積層体であって、第1層7

4はCu、第2層75はCrによって形成されている。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCr、第2層71はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27はCuによって形成されている。

【0110】

ケース4. 第2フリー磁性層55、下部固定磁性層24の磁性層52、上部固定磁性層28の磁性層60は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

第1フリー磁性層53は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、TはFe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0111】

下部非磁性材料層25は第1層74と第2層75の積層体であって、第1層74はCr、第2層75はCuによって形成されている。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCu、第2層71はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27はCrによって形成されている。

【0112】

ケース3及びケース4の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図3にまとめる。下部固定磁性層24の磁性層52、第1フリー磁性層53、第2フリー磁性層55、及び固定磁性層28の磁性層60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。図3では、下部非磁性材料層25が

第1層74と第2層75からなる2層構造であり、上部非磁性材料層27が単層構造である点が図2と異なっている。

【0113】

ここでも、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリテイスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリテイスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層53と第2フリー磁性層55の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0114】

図3をみると、ケース3の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0115】

また、ケース4の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0116】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0117】

なお、図2及び図3では、下部固定磁性層24の磁性層52の磁化方向と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化方向は平行方向を向いている。

【0118】

図4は本発明における第2実施形態の磁気検出素子の構造を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。

【0119】

図4に示す磁気検出素子が図1の磁気検出素子と異なる点は、下部非磁性材料層25、フリー磁性層26の非磁性中間層54、上部非磁性材料層27のうち、非磁性中間層54のみが2層構造になっている点である。また、下部固定磁性層24の磁性層50の磁化と上部固定磁性層28の磁性層62の磁化が反平行方向になるように固定されており、その結果、下部固定磁性層24の磁性層52と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化が反平行方向を向いている。

【0120】

その他、図1と同じ符号で示される層は、同じ材料及び同じ膜厚で形成されているので説明を省略する。

【0121】

図4に示される磁気検出素子の下部固定磁性層24、フリー磁性層26、及び上部固定磁性層28の材料は以下に示すとおりである。

【0122】

ケース1. 第2フリー磁性層55及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

第1フリー磁性層53、下部固定磁性層24の磁性層52は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選

ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0123】

下部非磁性材料層25はCrからなる。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCr、第2層71はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27はCuによって形成されている。

【0124】

ケース2: 第2フリー磁性層55及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiM合金(ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である)、CoQ合金(ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)、またはFeA合金(ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第1フリー磁性層53及び下部固定磁性層24の磁性層52は、NiX合金(ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である)、CoT合金(ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である)、FeZ合金(ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-Mn-D合金(ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0125】

下部非磁性材料層25はCuからなる。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCu、第2層71はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27はCrによって形成されている。

【0126】

下部固定磁性層24の磁性層50は磁性層52と同じ材料で、上部固定磁性層28の磁性層62は磁性層60と同じ材料で形成されている。

【0127】

前述のようにNiX合金、CoT合金、FeZ合金、またはCo-Mn-D合金をA群に属する合金とし、NiM合金、CoQ合金、FeA合金をB群に属する合金とすると、A群に属する合金は $\beta > 0$ である磁性材料であり、B群に属する合金は $\beta < 0$ である磁性材料である。

【0128】

また、下部固定磁性層24の磁性層52と下部非磁性材料層25との界面、下部非磁性材料層25と第1フリー磁性層53の界面、第1フリー磁性層53と非磁性中間層54との界面、非磁性中間層54と第2フリー磁性層55の界面、第2フリー磁性層55と上部非磁性材料層27、上部非磁性材料層27と上部固定磁性層28の磁性層60の界面における γ の正負の符号が、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しくなっている。

【0129】

本実施の形態では、第1フリー磁性層53の膜厚 t_1 、非磁性中間層54の膜厚 t_2 、第2フリー磁性層55の膜厚 t_3 、下部非磁性材料層25の膜厚 t_4 、上部非磁性材料層27の膜厚 t_5 がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピンの拡散長より小さくなっている。

【0130】

従って、磁気抵抗効果に関与する伝導電子が例えばアップスピンの伝導電子のとき、このアップスピンの伝導電子は、スピンの方向の同一性を保持したまま上部非磁性材料層27、第2フリー磁性層55、非磁性中間層54、第1フリー磁性層53、下部非磁性材料層25を流れることになる。

【0131】

ケース1及びケース2の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図5にまとめる。図5には、図4に示された磁気検出素子の磁気抵抗効果に関係ある層を模式的に示している。下部固定磁性層24の磁性層52、第1フリー磁性層53、第2フリー磁性層55、及び固定磁性層28の磁性層60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。ここで、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャ

ーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層53と第2フリー磁性層55の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0132】

図5をみると、ケース1の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0133】

また、ケース2の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0134】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0135】

また、下部固定磁性層24、下部非磁性材料層25、フリー磁性層26、上部非磁性材料層27、及び上部固定磁性層28を以下に示す材料の組み合わせで形成してもよい。

【0136】

ケース3. 第1フリー磁性層53及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfか

ら選ばれる1種の元素である)、FeZ合金(ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-Mn-D合金(ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第2フリー磁性層55及び下部固定磁性層24の磁性層52は、NiM合金(ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である)、CoQ合金(ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)、またはFeA合金(ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0137】

下部非磁性材料層25は第1層74と第2層75の積層体であって、第1層74はCr、第2層75はCuによって形成されている。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCu、第2層71はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27は第1層72と第2層73の積層体であって、第1層72はCr、第2層73はCuによって形成されている。

【0138】

ケース4. 第1フリー磁性層53及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiM合金(ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である)、CoQ合金(ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)、またはFeA合金(ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第2フリー磁性層55及び下部固定磁性層24の磁性層52は、NiX合金(ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である)、CoT合金(ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である)、FeZ合金(ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-

Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0139】

下部非磁性材料層25は第1層74と第2層75の積層体であって、第1層74はCu、第2層75はCrによって形成されている。フリー磁性層26の非磁性中間層54は、第1層70と第2層71の積層体であって、第1層70はCr、第2層71はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27は第1層72と第2層73の積層体であって、第1層72はCu、第2層73はCrによって形成されている。

【0140】

ケース3及びケース4の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図6にまとめる。下部固定磁性層24の磁性層52、第1フリー磁性層53、第2フリー磁性層55、及び固定磁性層28の磁性層60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。また、図6では、下部非磁性材料層25が第1層74と第2層75からなる2層構造であり、上部非磁性材料層27が第1層72と第2層73からなる2層構造である点で図5と異なっている。

【0141】

ここでも、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリテイスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリテイスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層53と第2フリー磁性層55の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0142】

図6をみると、ケース3の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0143】

また、ケース4の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層54、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0144】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0145】

なお、図5及び図6では、下部固定磁性層24の磁性層52の磁化方向と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化方向は反平行方向を向いている。

【0146】

図7は本発明における第3実施形態の磁気検出素子の構造を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。

【0147】

図7に示された磁気検出素子は図1に示された磁気検出素子に類似しており、フリー磁性層26に縦バイアスを与える方式が、図1に示された磁気検出素子と異なっている。

【0148】

なお、図1と同じ符号で示される層は、特に説明がない限り図6と同じ材料及び膜厚で形成された同一の層である。

【0149】

図7に示される磁気検出素子では、フリー磁性層26の両側領域にハードバイアス層が形成されず、かわりに上部反強磁性層29上に、中間層81を介してインスタックバイアス層82が形成されている。下地層21からインスタックバイアス層82まで重ねられた各層によって多層膜T3が形成されている。

【0150】

このインスタックバイアス層82はCoPtなどの硬磁性材料によって形成され、図示X方向と反平行方向に着磁されている。なお、インスタックバイアス層82と中間層81の間に、Crからなる下地層が形成されてもよい。中間層81の材料は、Ta、W、Mo、Cr、Cuなどの非磁性導伝性材料である。

【0151】

この実施形態では、インスタックバイアス層82の両側端部からフリー磁性層26に向けて縦バイアス磁界（静磁界）が供給され（矢印Mで示す）、フリー磁性層26の第2フリー磁性層55の磁化が図示X方向に向けられている。

【0152】

また、第2フリー磁性層55の単位面積当たりの磁気モーメントが、第1フリー磁性層53の単位面積当たりの磁気モーメントより大きくなり、第2フリー磁性層55の磁化がインスタックバイアス層82から与えられる縦バイアス磁界と同じ方向を向いている状態を安定化させている。

【0153】

図7に示されるインスタックバイアス層82が設けられた磁気検出素子は、フリー磁性層26が強固に磁化されることがなくフリー磁性層26の磁区制御を適正化でき、フリー磁性層26の外部磁界に対する磁化変動を良好にすることが可能である。また多層膜T3の両側端面S3、S3の両側領域にはアルミナまたはSiO₂からなる絶縁層83、83のみが形成されている。したがってセンス電流の分流ロスを低減させることが可能である。

【0154】

なお、図7に示される磁気検出素子は、上部反強磁性層29上にのみインスタックバイアス層82を形成しているが、下部反強磁性層23の下にインスタックバイアス層を設けてもよいし、反強磁性層29上と反強磁性層23の下の両方にインスタックバイアス層を設けてもよい。

【0155】

ただし、フリー磁性層26の第1フリー磁性層53と第2フリー磁性層55の磁化方向を反平行にさせるために、上側の反強磁性層29の上または下側の反強

磁性層 23 の下のどちらか一方にのみインスタックバイアス層を設けることが好ましい。その上で、フリー磁性層 26 の第 1 フリー磁性層 53 と第 2 フリー磁性層 55 のうち、インスタックバイアス層に近い方の膜厚を厚くすることがより好ましい。

【0156】

図 8 は本発明における第 4 実施形態の磁気検出素子の構造を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。

【0157】

図 8 に示された磁気検出素子は図 7 に示された磁気検出素子に類似しており、フリー磁性層 84 が 3 層の人工フェリ構造である点で図 7 に示された磁気検出素子と異なっている。また、下部固定磁性層 24 の磁性層 50 の磁化と上部固定磁性層 28 の磁性層 62 の磁化が反平行方向に固定されており、その結果、下部固定磁性層 24 の磁性層 52 と上部固定磁性層 28 の磁性層 60 の磁化が反平行方向を向いている。

【0158】

フリー磁性層 84 は、第 1 フリー磁性層 85、非磁性中間層 86、第 2 フリー磁性層 87、非磁性中間層 88、第 3 フリー磁性層 89 からなっている。第 1 フリー磁性層 85 と第 2 フリー磁性層 87 の磁化方向は、非磁性中間層 86 を介した RKKY 相互作用によって互いに反平行方向になっている。同様に、第 2 フリー磁性層 87 と第 3 フリー磁性層 89 の磁化方向も、非磁性中間層 88 を介した RKKY 相互作用によって互いに反平行方向になっている。

【0159】

フリー磁性層 84 を 3 層の人工フェリ構造にすると、第 1 フリー磁性層 85、第 2 フリー磁性層 87、第 3 フリー磁性層 89 の磁化方向を互いに反平行方向に固定するスピントロニック磁界が、図 1 ないし図 7 に示された 2 層の人工フェリ構造のフリー磁性層 26 に比べて 2 倍以上になる。従って、第 1 フリー磁性層 85、第 2 フリー磁性層 87、第 3 フリー磁性層 89 の磁化方向の反平行状態が縦バイアス磁界によって崩されることを防止でき、フリー磁性層全体の単磁区構造が安定化し、バルクハウゼンノイズを著しく低減できる。

【0160】

図8に示される磁気検出素子の下部固定磁性層24、フリー磁性層84、及び上部固定磁性層28の材料は以下に示すとおりである。

【0161】

ケース1. 第1フリー磁性層85、下部固定磁性層24の磁性層52、第3フリー磁性層89は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

第2フリー磁性層87、上部固定磁性層28の磁性層60は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0162】

下部非磁性材料層25はCuからなる。フリー磁性層84の非磁性中間層86は、第1層90と第2層91の積層体であって、第1層90はCu、第2層91はCrによって形成されている。非磁性中間層88も第1層92と第2層93の積層体であって、第1層92はCr、第2層93はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27も第1層72と第2層73の積層体であって、第1層72はCu、第2層73はCrによって形成されている。

【0163】

ケース2. 第1フリー磁性層85、下部固定磁性層24の磁性層52、第3フリー磁性層の磁性層89は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから

選ばれる1種の元素である)、またはFeA合金(ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第2フリー磁性層87及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金(ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である)、CoT合金(ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である)、FeZ合金(ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-Mn-D合金(ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0164】

下部非磁性材料層25はCrからなる。フリー磁性層84の非磁性中間層86は、第1層90と第2層91の積層体であって、第1層90はCr、第2層91はCuによって形成されている。非磁性中間層88も第1層92と第2層93の積層体であって、第1層92はCu、第2層93はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27も第1層72と第2層73の積層体であって、第1層72はCr、第2層73はCuによって形成されている。

【0165】

下部固定磁性層24の磁性層50は磁性層52と同じ材料で、上部固定磁性層28の磁性層62は磁性層60と同じ材料で形成されている。

【0166】

上記のNiX合金、CoT合金、FeZ合金、またはCo-Mn-D合金をA群に属する合金とし、NiM合金、CoQ合金、FeA合金をB群に属する合金とすると、A群に属する合金は $\beta > 0$ である磁性材料であり、B群に属する合金は $\beta < 0$ である磁性材料である。

【0167】

なお、 β は、 $\rho \downarrow / \rho \uparrow = (1 + \beta) / (1 - \beta)$ ($-1 \leq \beta \leq 1$) の関係式を満たす磁性材料に固有の値である(なお、 $\rho \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する比抵抗値であり、 $\rho \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティ

の伝導電子に対する比抵抗値である)。すなわち、磁性材料の β の値が正($\beta > 0$)のとき、 $\rho \downarrow > \rho \uparrow$ となり、磁性材料中を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子の方になる。一方、磁性材料の β の値が負($\beta < 0$)のとき、 $\rho \downarrow < \rho \uparrow$ となり、磁性材料中を流れやすいのはマイノリティの伝導電子の方になる。

【0168】

また、下部固定磁性層24の磁性層52と下部非磁性材料層25との界面、下部非磁性材料層25と第1フリー磁性層85の界面、第1フリー磁性層85と非磁性中間層86との界面、非磁性中間層86と第2フリー磁性層87の界面、第2フリー磁性層87と非磁性中間層88の界面、非磁性中間層88と第3フリー磁性層89の界面、第3フリー磁性層89と上部非磁性材料層27の界面、上部非磁性材料層27と上部固定磁性層28の磁性層60の界面における γ の正負の符号が、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しくなっている。

【0169】

なお、 γ は、 $r \downarrow / r \uparrow = (1 + \gamma) / (1 - \gamma)$ ($-1 \leq \gamma \leq 1$) の関係式を満たす界面に固有の値である(なお、 $r \downarrow$ は、伝導電子のうちマイノリティの伝導電子に対する界面抵抗値であり、 $r \uparrow$ は、伝導電子のうちメジャーリティの伝導電子に対する界面抵抗値である)。すなわち、 γ の値が正($\gamma > 0$)のとき、 $r \downarrow > r \uparrow$ となり、界面を流れやすいのはメジャーリティの伝導電子の方になる。一方、 γ の値が負($\gamma < 0$)のとき、 $r \downarrow < r \uparrow$ となり、界面を流れやすいのはマイノリティの伝導電子の方になる。

【0170】

導電性材料の中を電流が流れるとき、伝導電子はある距離だけ進むとスピンの向きが変化する。導電性材料の中を伝導電子がスピンを変えずに進む距離をスピン拡散長(Spin Diffusion Length)という。スピン拡散長は導電性材料によって特有の値を示す。

【0171】

本実施の形態では、第1フリー磁性層85の膜厚 t_{10} 、非磁性中間層86の膜厚 t_{11} 、第2フリー磁性層87の膜厚 t_{12} 、非磁性中間層88の膜厚 t_{13} 、第3フリー磁性層 t_{14} 、下部非磁性材料層25の膜厚 t_4 、上部非磁性材

料層 27 の膜厚 t_5 がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さくなっている。

【0172】

従って、磁気抵抗効果に関与する伝導電子が例えばアップスピンの伝導電子のとき、このアップスピンの伝導電子は、スピンの方向の同一性を保持したまま下部非磁性材料層 25、第 1 フリー磁性層 85、非磁性中間層 86、第 2 フリー磁性層 87、非磁性中間層 88、第 3 フリー磁性層 89、上部非磁性材料層 27 を流れることになる。

【0173】

例えば、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ のスピン拡散長は 150 \AA 、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ のスピン拡散長は 120 \AA 、 $\text{Ni}_{97}\text{Cr}_3$ のスピン拡散長は 50 \AA 、 $\text{Fe}_{95}\text{Cr}_5$ のスピン拡散長は 90 \AA 、 $\text{Fe}_{80}\text{Cr}_{20}$ のスピン拡散長は 40 \AA 、 Cu のスピン拡散長は 1000 \AA 、 Cr のスピン拡散長は 100 \AA である。

【0174】

ケース 1 及びケース 2 の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図 9 にまとめる。図 9 には、図 8 に示された磁気検出素子の磁気抵抗効果に関係ある層を模式的に示している。下部固定磁性層 24 の磁性層 52、第 1 フリー磁性層 85、第 2 フリー磁性層 87、第 3 フリー磁性層 89 及び固定磁性層 28 の磁性層 60 に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。ここで、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第 1 フリー磁性層 85、第 2 フリー磁性層 87、第 3 フリー磁性層 89 の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0175】

図 9 をみると、ケース 1 の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層 25、非磁性中間層 86、非磁性中間層 88、上部非磁性材料層 27）との界

面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0176】

また、ケース2の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0177】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0178】

また、下部固定磁性層24、下部非磁性材料層25、フリー磁性層84、上部非磁性材料層27、及び上部固定磁性層28を以下に示す材料の組み合わせで形成してもよい。

【0179】

ケース3、第1フリー磁性層85、第3フリー磁性層89、上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

下部固定磁性層24の磁性層52、第2フリー磁性層87は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA

合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0180】

下部非磁性材料層25は第1層74と第2層75の積層体であって、第1層74はCr、第2層75はCuによって形成されている。フリー磁性層84の非磁性中間層86は、第1層90と第2層91の積層体であって、第1層90はCu、第2層91はCrによって形成されている。非磁性中間層88は、第1層92と第2層93の積層体であって、第1層92はCr、第2層93はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27はCuによって形成されている。

【0181】

ケース4. 第1フリー磁性層85、第3フリー磁性層89、上部固定磁性層28の磁性層60は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成され

下部固定磁性層24の磁性層52、第2フリー磁性層87は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0182】

下部非磁性材料層25は第1層74と第2層75の積層体であって、第1層74はCu、第2層75はCrによって形成されている。フリー磁性層84の非磁性中間層86は、第1層90と第2層91の積層体であって、第1層90はCr、第2層91はCuによって形成されている。非磁性中間層88は、第1層92

と第2層93の積層体であって、第1層92はCu、第2層93はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27はCrによって形成されている。

【0183】

ケース3及びケース4の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図10にまとめる。下部固定磁性層24の磁性層52、第1フリー磁性層85、第2フリー磁性層87、第3フリー磁性層89、及び固定磁性層28の磁性層60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。また、図10では、下部非磁性材料層25が第1層74と第2層75からなる2層構造であり、上部非磁性材料層27が単層構造である点が図9と異なっている。

【0184】

ここでも、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層85、第2フリー磁性層87、第3フリー磁性層89の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0185】

図10をみると、ケース3の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0186】

また、ケース4の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0187】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0188】

なお、図9及び図10では、下部固定磁性層24の磁性層52の磁化方向と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化方向は反平行方向を向いている。

【0189】

図11は本発明における第5実施形態の磁気検出素子の構造を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。

【0190】

図11に示す磁気検出素子が図8の磁気検出素子と異なる点は、下部非磁性材料層25、フリー磁性層84の非磁性中間層86、上部非磁性材料層27のうち、非磁性中間層86と非磁性中間層88のみが2層構造になっている点である。また、下部固定磁性層24の磁性層50の磁化と上部固定磁性層28の磁性層62の磁化が平行方向に固定されており、その結果、下部固定磁性層24の磁性層52と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化が平行方向を向いている。

【0191】

その他、図8と同じ符号で示される層は、同じ材料及び同じ膜厚で形成されているので説明を省略する。

【0192】

図1に示される磁気検出素子の下部固定磁性層24、フリー磁性層84、及び上部固定磁性層28の材料は以下に示すとおりである。

【0193】

ケース1. 第1フリー磁性層85、第3フリー磁性層89、下部固定磁性層24の磁性層52及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、

Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-Mn-D合金(ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第2フリー磁性層87は、NiM合金(ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である)、CoQ合金(ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)、またはFeA合金(ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0194】

下部非磁性材料層25はCuからなる。フリー磁性層84の非磁性中間層86は、第1層90と第2層91の積層体であって、第1層90はCu、第2層91はCrによって形成されている。非磁性中間層88も、第1層92と第2層93の積層体であって、第1層92はCr、第2層93はCuによって形成されている。上部非磁性材料層27はCuによって形成されている。

【0195】

ケース2: 第1フリー磁性層85、第3フリー磁性層89、下部固定磁性層24の磁性層52及び上部固定磁性層28の磁性層60は、NiM合金(ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である)、CoQ合金(ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)、またはFeA合金(ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である)によって形成され、

第2フリー磁性層87は、NiX合金(ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である)、CoT合金(ただし、TはFe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である)、FeZ合金(ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である)、またはCo-Mn-D合金(ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である)によって形成される。

【0196】

下部非磁性材料層25はCrからなる。フリー磁性層84の非磁性中間層86は、第1層90と第2層91の積層体であって、第1層90はCr、第2層91はCuによって形成されている。非磁性中間層88も、第1層92と第2層93の積層体であって、第1層92はCu、第2層93はCrによって形成されている。上部非磁性材料層27はCrによって形成されている。

【0197】

下部固定磁性層24の磁性層50は磁性層52と同じ材料で、上部固定磁性層28の磁性層62は磁性層60と同じ材料で形成されている。

【0198】

前述のようにNiX合金、CoT合金、FeZ合金、またはCo-Mn-D合金をA群に属する合金とし、NiM合金、CoQ合金、FeA合金をB群に属する合金とすると、A群に属する合金は $\beta > 0$ である磁性材料であり、B群に属する合金は $\beta < 0$ である磁性材料である。

【0199】

また、下部固定磁性層24の磁性層52と下部非磁性材料層25との界面、下部非磁性材料層25と第1フリー磁性層85の界面、第1フリー磁性層85と非磁性中間層86との界面、非磁性中間層86と第2フリー磁性層87の界面、第2フリー磁性層87と非磁性中間層88の界面、非磁性中間層88と第3フリー磁性層89の界面、第3フリー磁性層89と上部非磁性材料層27の界面、上部非磁性材料層27と上部固定磁性層28の磁性層60の界面における γ の正負の符号が、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しくなっている。

【0200】

本実施の形態では、第1フリー磁性層85の膜厚 t_{10} 、非磁性中間層86の膜厚 t_{11} 、第2フリー磁性層87の膜厚 t_{12} 、非磁性中間層88の膜厚 t_{13} 、第3フリー磁性層 t_{14} 、下部非磁性材料層25の膜厚 t_4 、上部非磁性材料層27の膜厚 t_5 がすべて、それぞれの層を形成している材料のスピン拡散長より小さくなっている。

【0201】

従って、磁気抵抗効果に関与する伝導電子が例えばアップスピンの伝導電子のとき、このアップスピンの伝導電子は、スピンの方向の同一性を保持したまま下部非磁性材料層25、第1フリー磁性層85、非磁性中間層86、第2フリー磁性層87、非磁性中間層88、第3フリー磁性層89、上部非磁性材料層27を流れることになる。

【0202】

例えば、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ のスピンの拡散長は150 Å、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ のスピンの拡散長は120 Å、 $\text{Ni}_{97}\text{Cr}_3$ のスピンの拡散長は50 Å、 $\text{Fe}_{95}\text{Cr}_5$ のスピンの拡散長は90 Å、 $\text{Fe}_{80}\text{Cr}_{20}$ のスピンの拡散長は40 Å、Cuのスピンの拡散長は1000 Å、Crのスピンの拡散長は100 Åである。

【0203】

ケース1及びケース2の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図12にまとめる。図12には、図11に示された磁気検出素子の磁気抵抗効果に関係ある層を模式的に示している。下部固定磁性層24の磁性層52、第1フリー磁性層85、第2フリー磁性層87、第3フリー磁性層89及び固定磁性層28の磁性層60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。ここで、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層85、第2フリー磁性層87、第3フリー磁性層89の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0204】

図12をみると、ケース1の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0205】

また、ケース2の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0206】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0207】

また、下部固定磁性層24、下部非磁性材料層25、フリー磁性層84、上部非磁性材料層27、及び上部固定磁性層28を以下に示す材料の組み合わせで形成してもよい。

【0208】

ケース3. 第2フリー磁性層87、下部固定磁性層24の磁性層52、上部固定磁性層28の磁性層60は、NiX合金（ただし、XはCo、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Auから選ばれる1種の元素である）、CoT合金（ただし、Tは、Fe、Zr、Ta、Hfから選ばれる1種の元素である）、FeZ合金（ただし、ZはNi、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Geから選ばれる1種の元素である）、またはCo-Mn-D合金（ただし、DはAl、Ga、Si、Ge、Snから選ばれる1種の元素である）によって形成され、

第1フリー磁性層85、第3フリー磁性層89は、NiM合金（ただし、MはCr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Taから選ばれる1種の元素である）、CoQ合金（ただし、QはMn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）、またはFeA合金（ただし、AはMn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、Wから選ばれる1種の元素である）によって形成される。

【0209】

下部非磁性材料層 25 は第 1 層 74 と第 2 層 75 の積層体であって、第 1 層 74 は Cu、第 2 層 75 は Cr によって形成されている。フリー磁性層 84 の非磁性中間層 86 は、第 1 層 90 と第 2 層 91 の積層体であって、第 1 層 90 は Cr、第 2 層 91 は Cu によって形成されている。非磁性中間層 88 は、第 1 層 92 と第 2 層 93 の積層体であって、第 1 層 92 は Cu、第 2 層 93 は Cr によって形成されている。上部非磁性材料層 27 は第 1 層 72 と第 2 層 73 の積層体であって、第 1 層 72 は Cr、第 2 層 73 は Cu によって形成されている。

【0210】

ケース 4. 第 2 フリー磁性層 87、下部固定磁性層 24 の磁性層 52、上部固定磁性層 28 の磁性層 60 は、NiM 合金（ただし、M は Cr、Rh、Ru、Mo、Nb、Pt、Ir、Os、Re、W、Ta から選ばれる 1 種の元素である）、CoQ 合金（ただし、Q は Mn、Cr、Ru、Mo、Ir、Os、Re、W から選ばれる 1 種の元素である）、または FeA 合金（ただし、A は Mn、Cr、V、Ti、Ru、Mo、Os、Re、W から選ばれる 1 種の元素である）によって形成され、

第 1 フリー磁性層 85、第 3 フリー磁性層 89 は、NiX 合金（ただし、X は Co、Fe、Mn、Zr、Hf、Cu、Au から選ばれる 1 種の元素である）、CoT 合金（ただし、T は、Fe、Zr、Ta、Hf から選ばれる 1 種の元素である）、FeZ 合金（ただし、Z は Ni、Co、Rh、Pt、Ir、Be、Al、Si、Ga、Ge から選ばれる 1 種の元素である）、または Co-Mn-D 合金（ただし、D は Al、Ga、Si、Ge、Sn から選ばれる 1 種の元素である）によって形成される。

【0211】

下部非磁性材料層 25 は第 1 層 74 と第 2 層 75 の積層体であって、第 1 層 74 は Cr、第 2 層 75 は Cu によって形成されている。フリー磁性層 84 の非磁性中間層 86 は、第 1 層 90 と第 2 層 91 の積層体であって、第 1 層 90 は Cu、第 2 層 91 は Cr によって形成されている。非磁性中間層 88 は、第 1 層 92 と第 2 層 93 の積層体であって、第 1 層 92 は Cr、第 2 層 93 は Cu によって形成されている。上部非磁性材料層 27 は第 1 層 72 と第 2 層 73 の積層体であ

って、第1層72はCu、第2層73はCrによって形成されている。

【0212】

ケース3及びケース4の材料の組み合わせにおける、各磁性層と β と γ の値の関係を図13にまとめる。下部固定磁性層24の磁性層52、第1フリー磁性層85、第2フリー磁性層87、第3フリー磁性層89、及び固定磁性層28の磁性層60に記された矢印はそれぞれの磁性層の磁化方向を示している。また、図13では、下部非磁性材料層25が第1層74と第2層75からなる2層構造であり、上部非磁性材料層27も第1層72と第2層73からなる2層構造である点が図12と異なっている。

【0213】

ここでも、磁化が図示右方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはアップスピンであり、磁化が図示左方向を向いている磁性層の磁性に関わる電子のメジャーリティスピンはダウンスピンであるとする。なお、第1フリー磁性層85、第2フリー磁性層87、第3フリー磁性層89の磁化は、磁気検出素子の抵抗値が最も低くなる時の方向を向いている。

【0214】

図13をみると、ケース3の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0215】

また、ケース4の材料の組み合わせのときは、全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さく、また、全ての磁性層と非磁性材料からなる層（下部非磁性材料層25、非磁性中間層86、非磁性中間層88、上部非磁性材料層27）との界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなっている。

【0216】

従って、低抵抗状態における伝導電子の流れやすさと高抵抗状態における伝導電子の流れやすさの差を大きくすることができ、単位面積当たりの磁気抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0217】

なお、図12及び図13では、下部固定磁性層24の磁性層52の磁化方向と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化方向は平行方向を向いている。

【0218】

また、図8及び図11では、フリー磁性層84に縦バイアスを与えるのは、インスタックバイアス層82であるが、図1に示されるようなハードバイアス層によって、フリー磁性層84に縦バイアス磁界を与えてもよい。

【0219】

図1に示された磁気検出素子の製造方法について説明する。

まず、第1の電極層20の中央上に、下から下地層21、シード層22、下部反強磁性層23、磁性層50、非磁性中間層51、磁性層52（下部固定磁性層24）、下部非磁性材料層25、第1フリー磁性層53、非磁性中間層54、第2フリー磁性層55（フリー磁性層26）、上部非磁性材料層27、磁性層60、非磁性中間層61、磁性層62（上部固定磁性層28）、上部反強磁性層29を真空中でベタ膜状に連続成膜して多層膜T1の積層構造を形成する。各層の材料及び膜厚は、図1に示された完成後の磁気検出素子と同じである。

【0220】

多層膜T1をハイト方向（図示Y方向）の磁場中でアニールして、下部反強磁性層23と下部固定磁性層24の磁性層50間及び上部反強磁性層29と上部固定磁性層28の磁性層62間に交換結合磁界を発生させる。

【0221】

磁場中アニールの温度は例えば270℃であり、磁界の大きさは、800 kA/mの強磁場で行うか、または8～30 (kA/m)、例えば24 (kA/m)である。

【0222】

下部固定磁性層 2 4 の磁性層 5 0 と磁性層 5 2 を同じ組成の磁性材料を用いて形成し、磁性層 5 0 の膜厚 t_6 を磁性層 5 2 の膜厚 t_7 より小さくし、また、上部固定磁性層 2 8 の磁性層 6 0 と磁性層 6 2 を同じ組成の磁性材料を用いて形成し、磁性層 6 2 の膜厚 t_7 を磁性層 6 0 の膜厚 t_8 より小さくしている。

【 0 2 2 3 】

従って、磁性層 5 0 の単位面積当たりの磁気モーメント < 磁性層 5 2 の単位面積当たりの磁気モーメント、かつ磁性層 6 2 の単位面積当たりの磁気モーメント < 磁性層 6 0 の単位面積当たりの磁気モーメントとなっている。

【 0 2 2 4 】

上記 8 ~ 3 0 (k A / m) の磁場中アニールによって、磁性層 5 0 及び磁性層 6 2 の磁化がハイト方向 (図示 Y 方向) と反平行方向に向いている状態で固定され、非磁性中間層 5 1 または非磁性中間層 6 1 を介した R K K Y 相互作用によって磁性層 5 2 及び磁性層 6 0 の磁化がハイト方向 (図示 Y 方向) に固定される。

【 0 2 2 5 】

なお、磁場中アニールを 8 0 0 (k A / m) 以上の磁場中で行ったときは、磁性層 5 0 及び磁性層 6 2 の磁化がハイト方向 (図示 Y 方向) に向いた状態で固定される。

【 0 2 2 6 】

次に、上部反強磁性層 2 9 上に、磁気検出素子の光学的な素子面積と同程度かあるいはそれよりも若干小さい面積を覆うリフトオフ用のレジスト層を形成する。

【 0 2 2 7 】

次に、前記レジスト層に覆われていない、上部反強磁性層 2 9 から下地層 2 1 までの多層膜 T 1 をイオンミリングなどで除去する。これにより第 1 の電極層 2 0 の上面中央には、下地層 2 1 から上部反強磁性層 2 9 までで構成される多層膜 T 1 が略台形状となって残される。なおイオンミリング後、多層膜 T 1 の両側端面 S 1, S 1 にはミリングで除去された物質の一部が再付着するので、再付着物をサイドミリングで除去することが好ましい。

【 0 2 2 8 】

次に、第1の電極層20上から多層膜T1の両側端面S1，S1上にかけて、 Al_2O_3 などで形成された絶縁層31，31、Crなどで形成されたバイアス下地層32，32、CoPtCrなどで形成されたハードバイアス層33，33及び Al_2O_3 などで形成された絶縁層34，34をスパッタ成膜する。

【0229】

なお、絶縁層31，31から絶縁層34，34までの各層のスパッタ成膜の際におけるスパッタ粒子照射角度は基板に対しほぼ垂直方向Gとすることが好ましい。

【0230】

多層膜T1の両側領域に絶縁層31，31から絶縁層34，34までの各層を積層した後、前記レジスト層R1を除去する。

【0231】

その後、絶縁層34，34上から多層膜T1の反強磁性層29上にかけて第2の電極層30をスパッタ成膜することにより、図1に示された磁気検出素子を形成できる。

【0232】

また図4に示される磁気検出素子のように、下部固定磁性層24の磁性層52が、例えばハイト方向（図示Y方向）に固定され、上部固定磁性層28の磁性層60が、ハイト方向（図示Y方向）と反平行方向に固定されるときには、各磁性層の膜厚を以下のように調節する。

【0233】

すなわち、下部固定磁性層24の磁性層50と磁性層52を同じ組成の磁性材料を用いて形成し、磁性層50の膜厚 t_6 を磁性層52の膜厚 t_7 より小さく（ $t_6 < t_7$ ）し、また、上部固定磁性層28の磁性層60と磁性層62を同じ組成の磁性材料を用いて形成し、磁性層62の膜厚 t_9 を磁性層60の膜厚 t_8 より大きく（ $t_9 > t_8$ ）している。

【0234】

これによって、磁性層50の単位面積当たりの磁気モーメント<磁性層52の単位面積当たりの磁気モーメント、かつ磁性層62の単位面積当たりの磁気モー

メント>磁性層60の単位面積当たりの磁気モーメントとし、図4の磁気検出素子を製造するときに、スピントロップ磁界の大きさより弱い磁場中の磁場中アニールを1回行うだけで、磁性層52と磁性層60の磁化方向を反平行にすることができる。

【0235】

なお、磁性層50の膜厚 t_6 を磁性層52の膜厚 t_7 より大きく($t_6 > t_7$)し、また、磁性層62の膜厚 t_9 を磁性層60の膜厚 t_8 より小さく($t_9 < t_8$)しても、1回の磁場中アニールによって、磁性層52と磁性層60の磁化方向を反平行にすることができる。

【0236】

また、下部固定磁性層24の磁性層52と上部固定磁性層28の磁性層60の磁化方向を反平行にする他の方法として以下に示す製造方法を用いることができる。

【0237】

まず、第1の電極層20の中央上に、下から下地層21、シード層22、下部反強磁性層23、磁性層50、非磁性中間層51、磁性層52（下部固定磁性層24）、下部非磁性材料層25、第1フリー磁性層53、非磁性中間層54、第2フリー磁性層55（フリー磁性層26）、上部非磁性材料層27、磁性層60、非磁性中間層61、磁性層62（上部固定磁性層28）、及び上部反強磁性層29の一部（反強磁性が生じない厚さ、例えば50Å以下）、を真空中でベタ膜状に連続成膜し、第1の磁場中アニールを行う。

【0238】

第1の磁場中アニール後、上部反強磁性層29を反強磁性が生じる膜厚以上に厚くして、第1の磁場中アニール時の磁場の方向と反平行方向の磁場で第2の磁場中アニールをする。

【0239】

2回の磁場中アニールを行う方法であれば、下部固定磁性層24の磁性層50と磁性層52を同じ組成の磁性材料を用いて形成し、磁性層50の膜厚 t_6 を磁性層52の膜厚 t_7 以上にし($t_6 \geq t_7$)、また、上部固定磁性層28の磁性

層 60 と磁性層 62 を同じ組成の磁性材料を用いて形成し、磁性層 62 の膜厚 t_9 を磁性層 60 の膜厚 t_8 以上 ($t_9 \geq t_8$) にしても、下部固定磁性層 24 の磁性層 52 と上部固定磁性層 28 の磁性層 60 の磁化方向を反平行にすることができる。または、磁性層 50 の膜厚 t_6 を磁性層 52 の膜厚 t_7 以下にし ($t_6 \leq t_7$)、また、磁性層 62 の膜厚 t_9 を磁性層 60 の膜厚 t_8 以下 ($t_9 \leq t_8$) にした場合でも同様である。

【0240】

$t_6 \geq t_7$ かつ $t_9 \geq t_8$ 、または $t_6 \leq t_7$ かつ $t_9 \leq t_8$ の構成であると、下部反強磁性層 23 と下部固定磁性層 24 間の一方向性異方性磁界 H_{ex}^* と上部反強磁性層 29 と上部固定磁性層 28 間の一方向性異方性磁界 H_{ex}^* の大きさを同程度の値に合わせやすくなる。

【0241】

なお、上述した実施の形態では、磁性層及び非磁性材料からなる層の β 、 γ 両方の正負をアップスピンまたはダウンスピンの伝導電子に対する比抵抗や界面抵抗の観点から最適化するように調節した。ただし、本発明には、磁性層の β のみ実施の形態に示したように調節したり、界面の γ のみを調節したものも含まれる。例えば、各磁性層を実施の形態に示した β の組み合わせになる材料で形成し、各非磁性材料層は Cu、各非磁性中間層は Ru で形成するという形態でもよい。

【0242】

【発明の効果】

以上詳細に説明した本発明では、前記第 1 フリー磁性層、前記第 2 フリー磁性層、前記下部固定磁性層及び前記上部固定磁性層（以下これらをまとめて呼ぶときは単に磁性層と呼ぶ）それぞれを形成する磁性材料の β を規定することにより、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなるか、または全ての磁性層においてダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0243】

さらに、本発明では、前記第1フリー磁性層、第2フリー磁性層、第3フリー磁性層、下部固定磁性層、または上部固定磁性層と、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の界面における γ の正負の符号を、その界面に接している磁性層の β の正負の符号と等しくすることにより、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層の磁化が変化したときに、磁性層と非磁性材料からなる層（非磁性材料層及び非磁性中間層）の全ての界面における、アップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなるか、または、全ての前記界面における、ダウンスピンの伝導電子に対する界面抵抗値がアップスピンの伝導電子に対する界面抵抗値よりも小さくなり、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【0244】

なお、上記のように γ を規定するためには、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の上面と磁性層の界面における γ の正負の符号と、前記非磁性材料層または前記非磁性中間層の下面と磁性層の界面における γ の正負の符号を異ならせることが必要になる場合があるが、本発明では、前記非磁性材料層及び／または前記非磁性中間層を、種類の異なる非磁性材料からなる2層構造とすることによってそのような問題を解決できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明における第1の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図、

【図2】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図3】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図4】

本発明における第 2 の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図、

【図 5】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図 6】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図 7】

本発明における第 3 の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図、

【図 8】

本発明における第 4 の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図、

【図 9】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図 1 0】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図 1 1】

本発明における第 5 の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図、

【図 1 2】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図 1 3】

本発明の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせの例を示す様式図、

【図 1 4】

従来の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図、

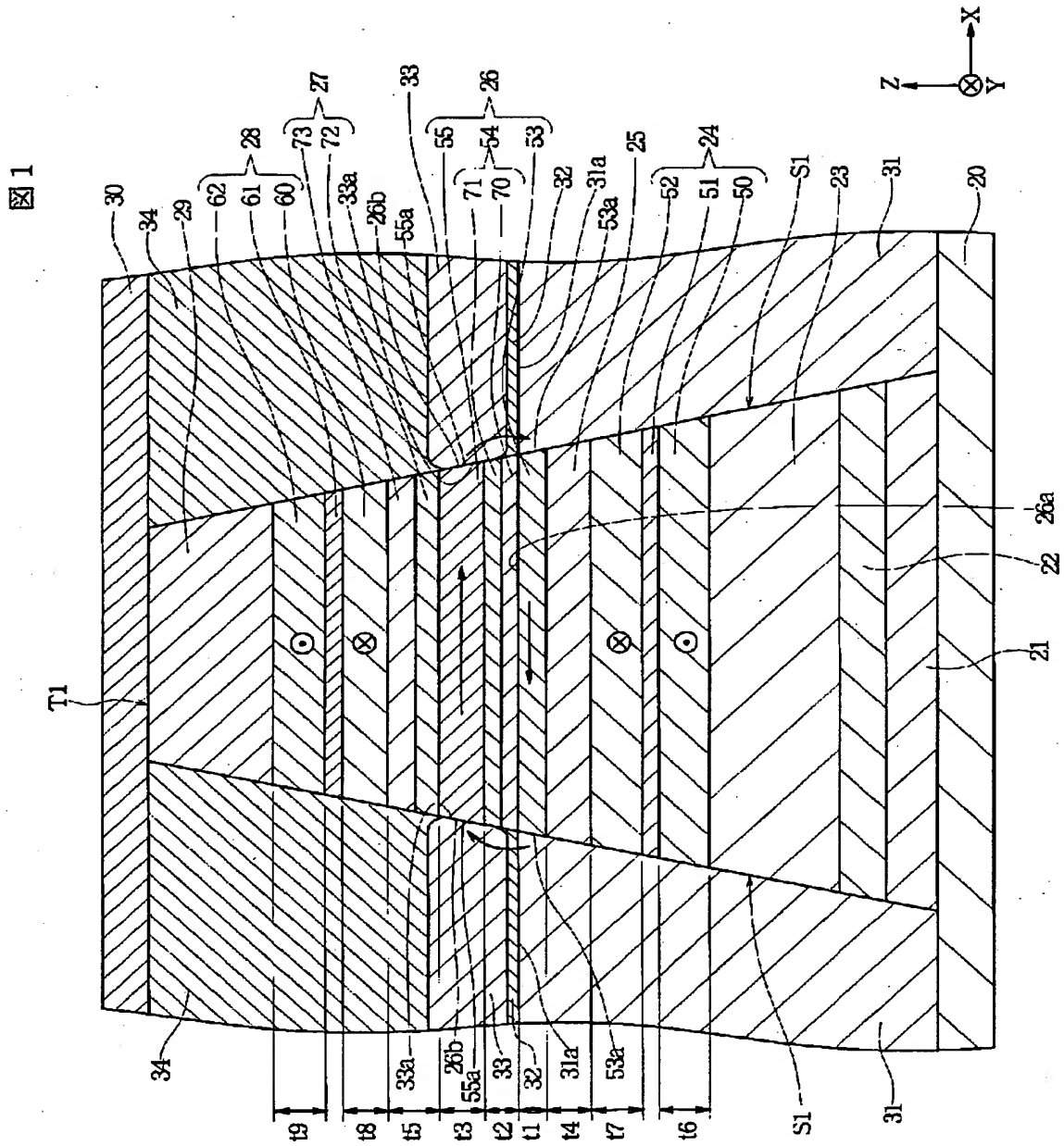
【図 1 5】

従来の磁気検出素子の磁性層の β の正負と、磁性層と非磁性材料からなる層の界面における γ の組み合わせを示す様式図、

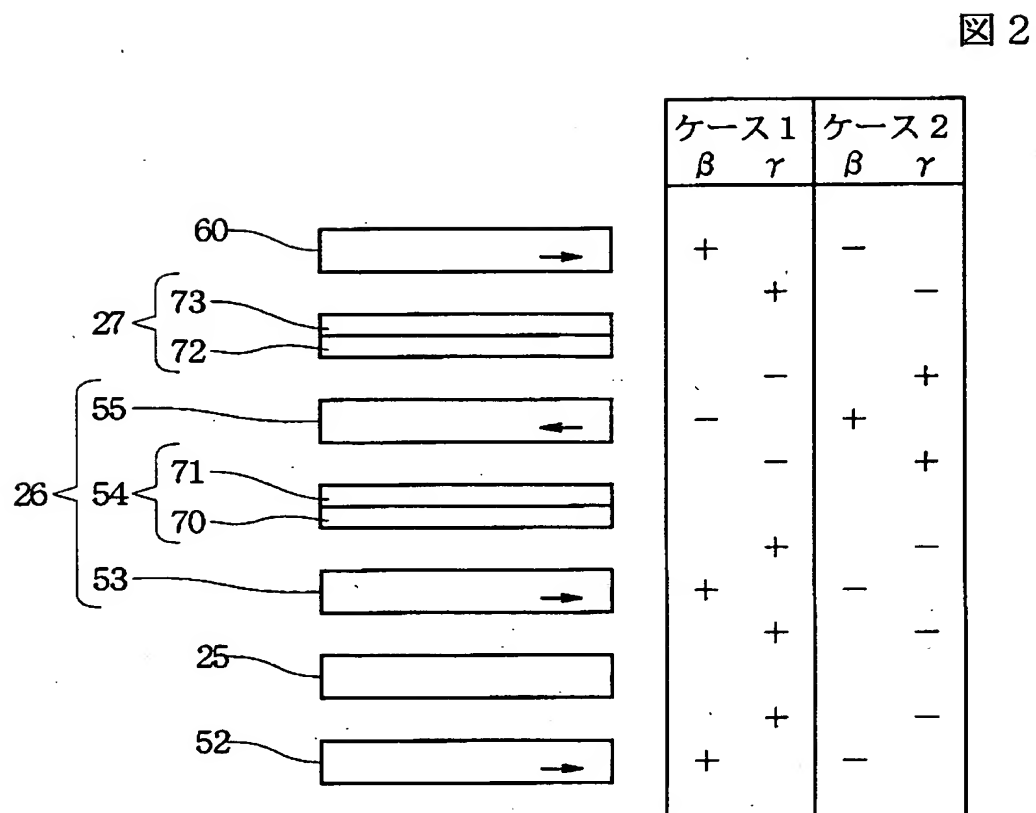
【符号の説明】

- 2 0 第 1 の電極層
- 2 1 下地層
- 2 2 シード層
- 2 3、2 9 反強磁性層
- 2 4、2 8 固定磁性層
- 2 5、2 7 非磁性材料層
- 2 6、8 4 フリー磁性層
- 5 3 磁性層
- 5 4 非磁性中間層
- 5 5 磁性層
- 3 0 第 2 の電極層
- 3 1、3 4 絶縁層
- 3 2 バイアス下地層
- 3 3 ハードバイアス層
- 8 0、8 2 インスタックバイアス層
- 8 1 中間層

【書類名】 図面
【図 1】

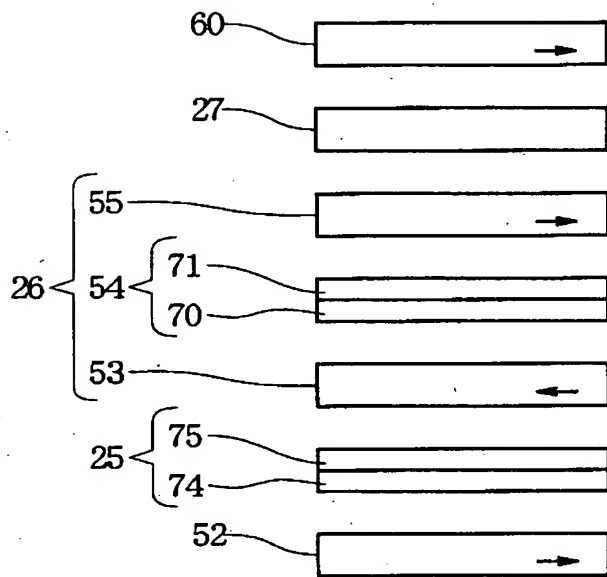


【図 2】



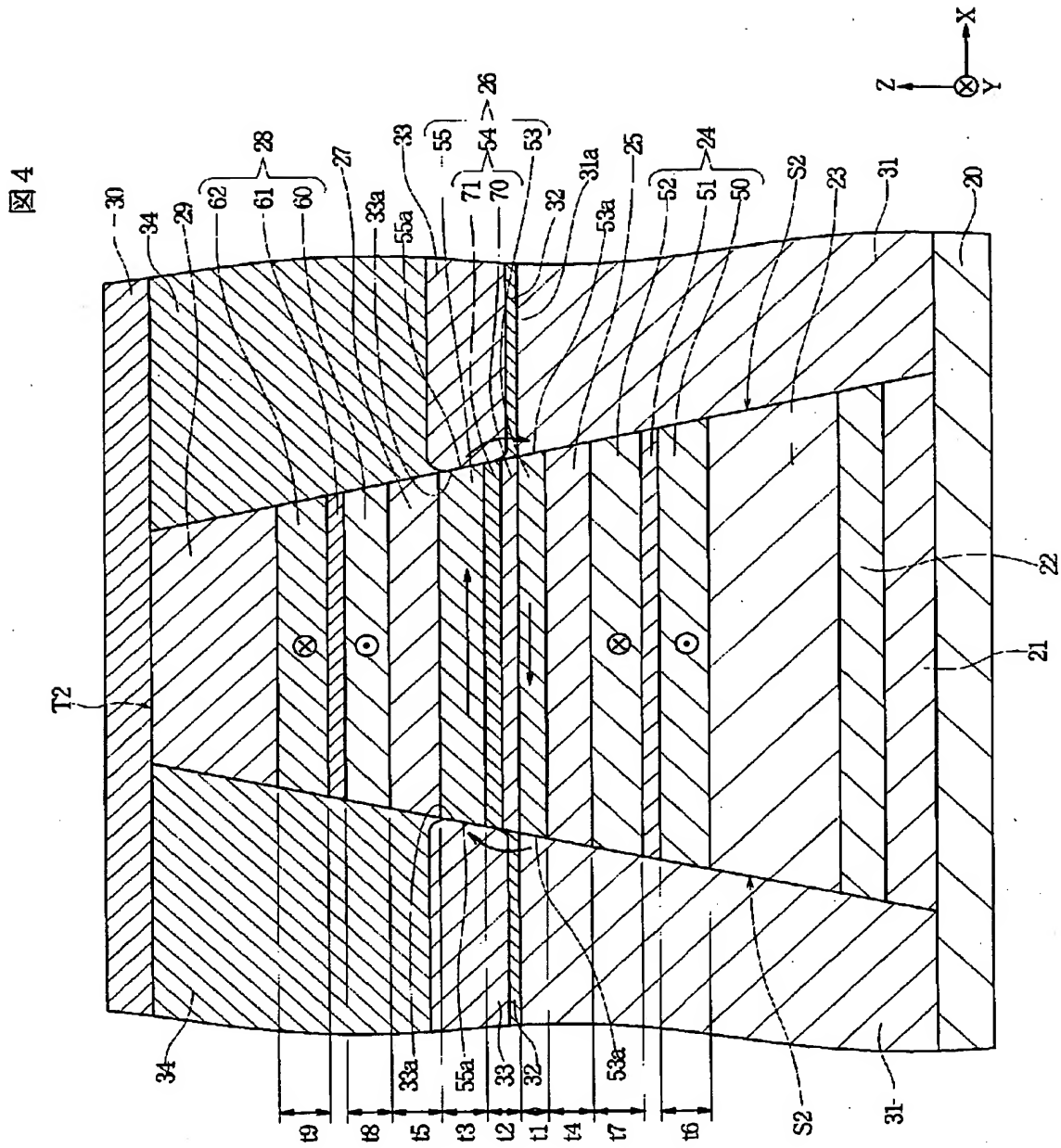
【図 3】

図 3



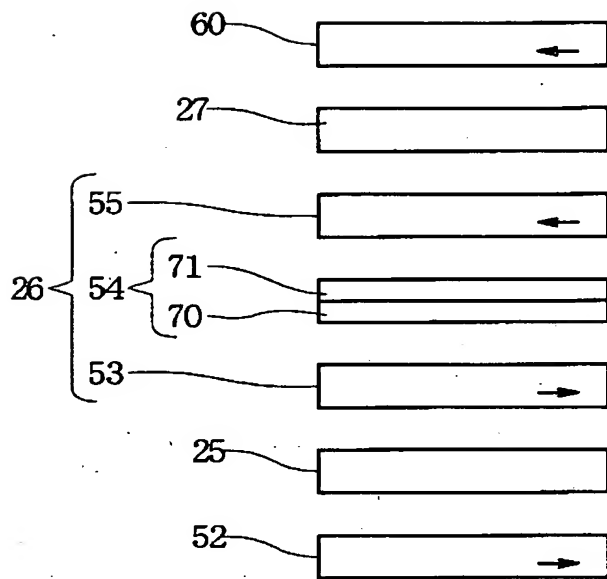
ケース 3		ケース 4	
β	γ	β	γ
+		-	
	+		-
	+		-
+		-	
	+		-
	+		-
-	-	+	+
	-		+
	+		-
+		-	

【図 4】



【図 5】

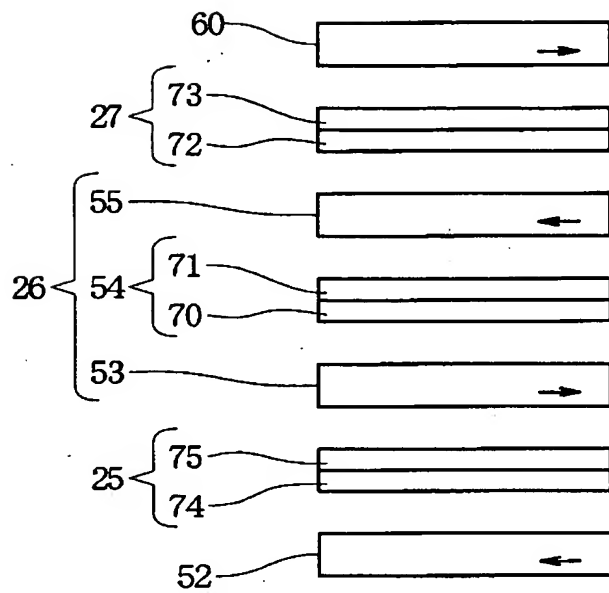
図 5



ケース 1		ケース 2	
β	r	β	r
+	+	-	-
	+		-
+	+	-	-
	-		+
-	-	+	+
	-		+
-		+	

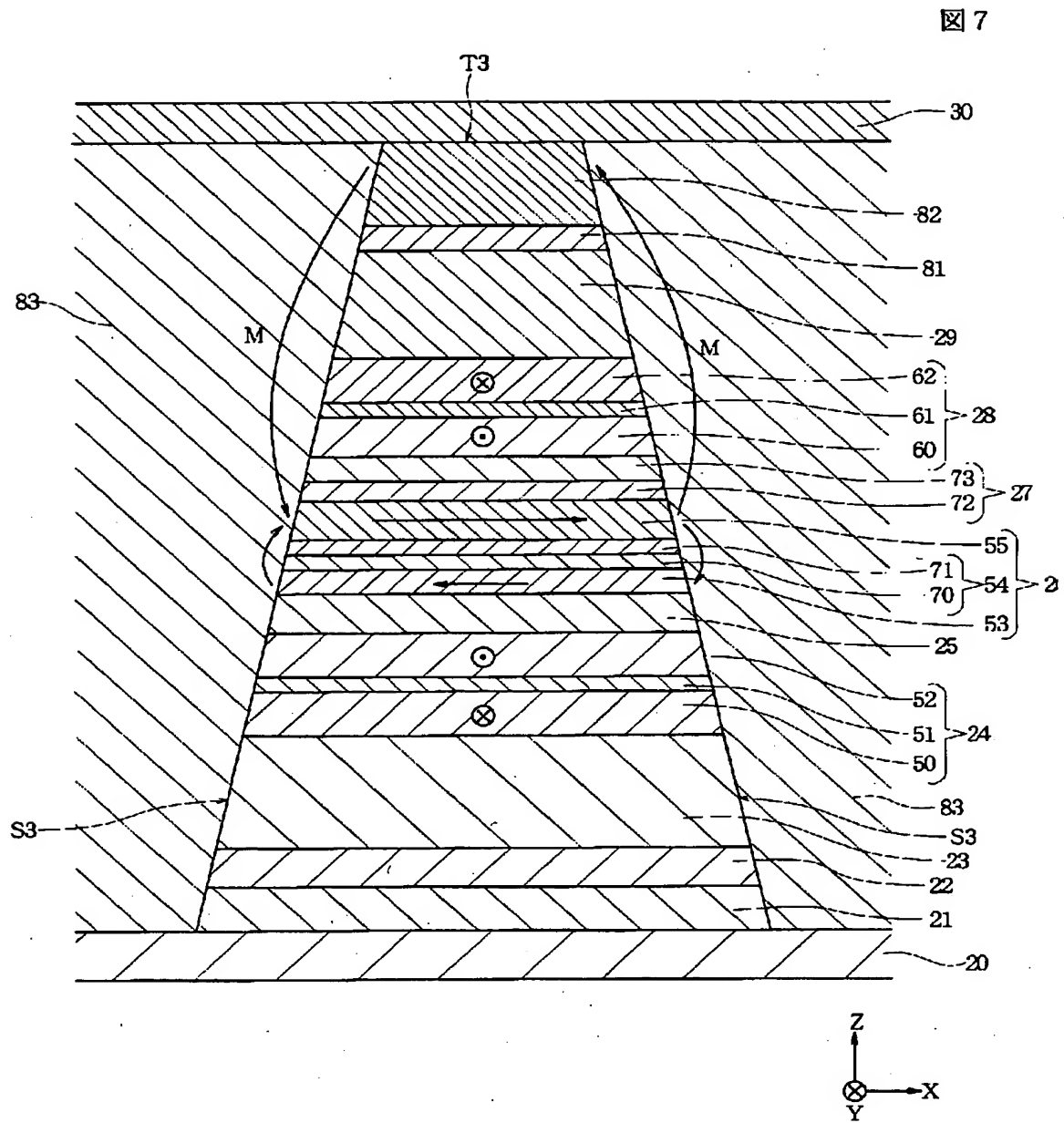
【図 6】

図 6



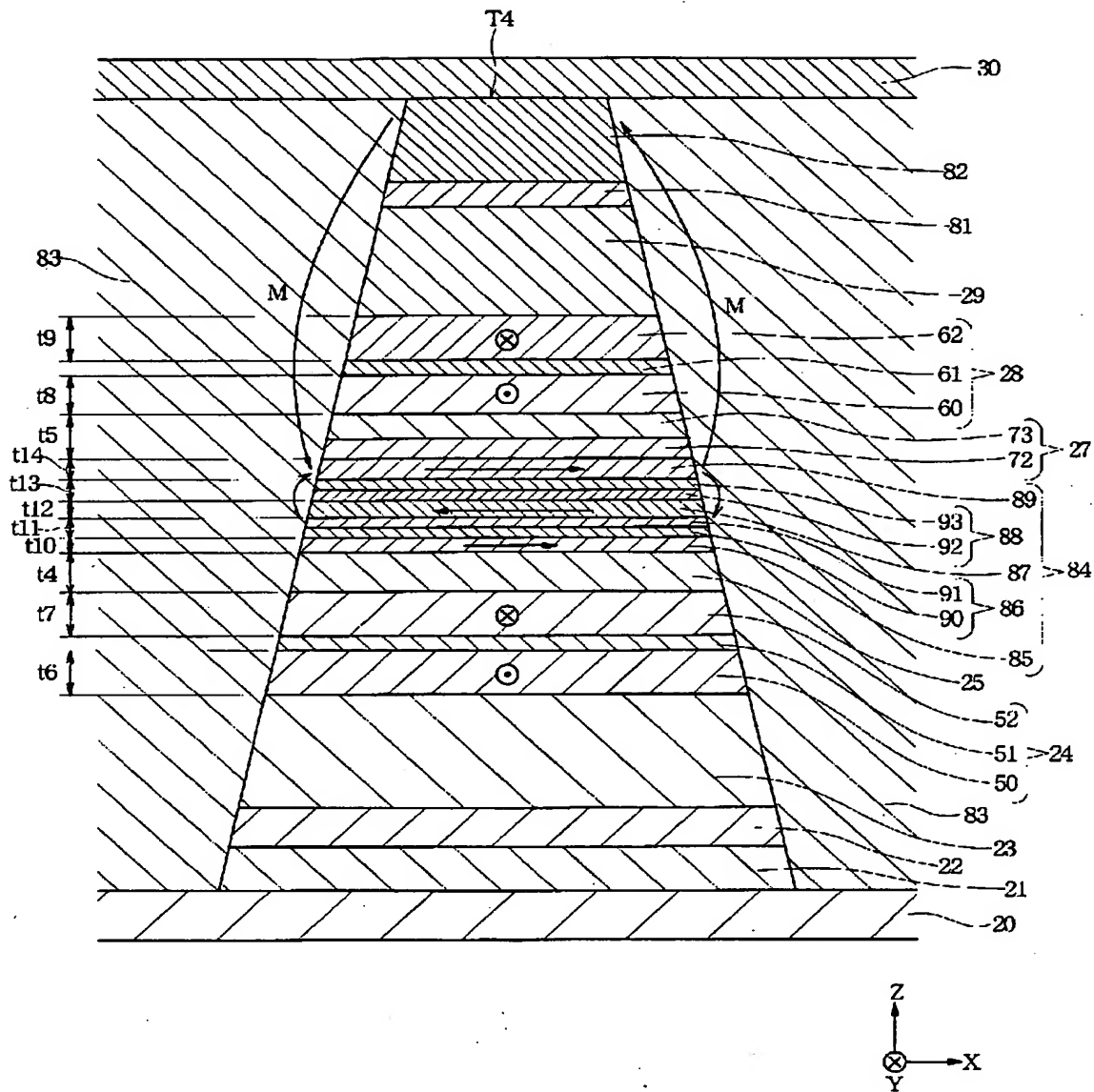
ケース 3		ケース 4	
β	γ	β	γ
+		-	
	+		-
	-		+
-		+	
	-		+
	+		-
+		-	
	+		-
	-		+
-		+	

【図 7】



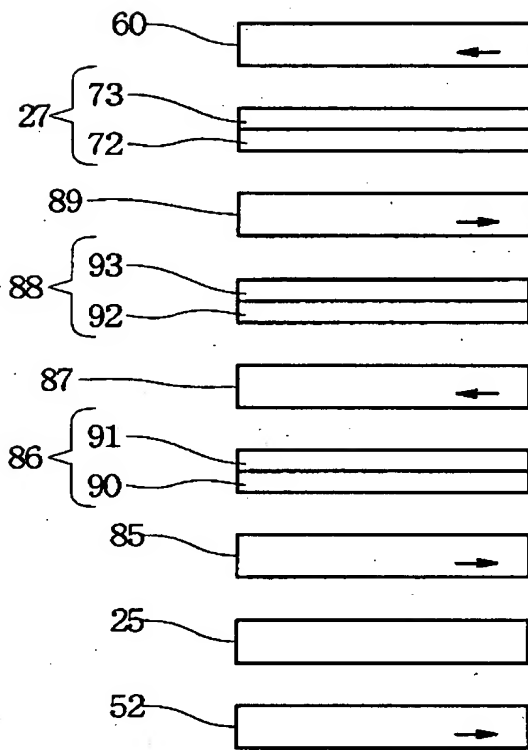
【図 8】

図 8



【図9】



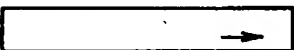
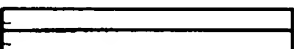




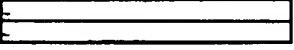
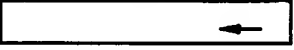


図9



ケース1		ケース2	
β	γ	β	γ
-	-	+	+
	+	-	-
+	+	-	-
	-	+	+
-	-		+
	+	-	-
+	+	-	-
	+		-
+		-	

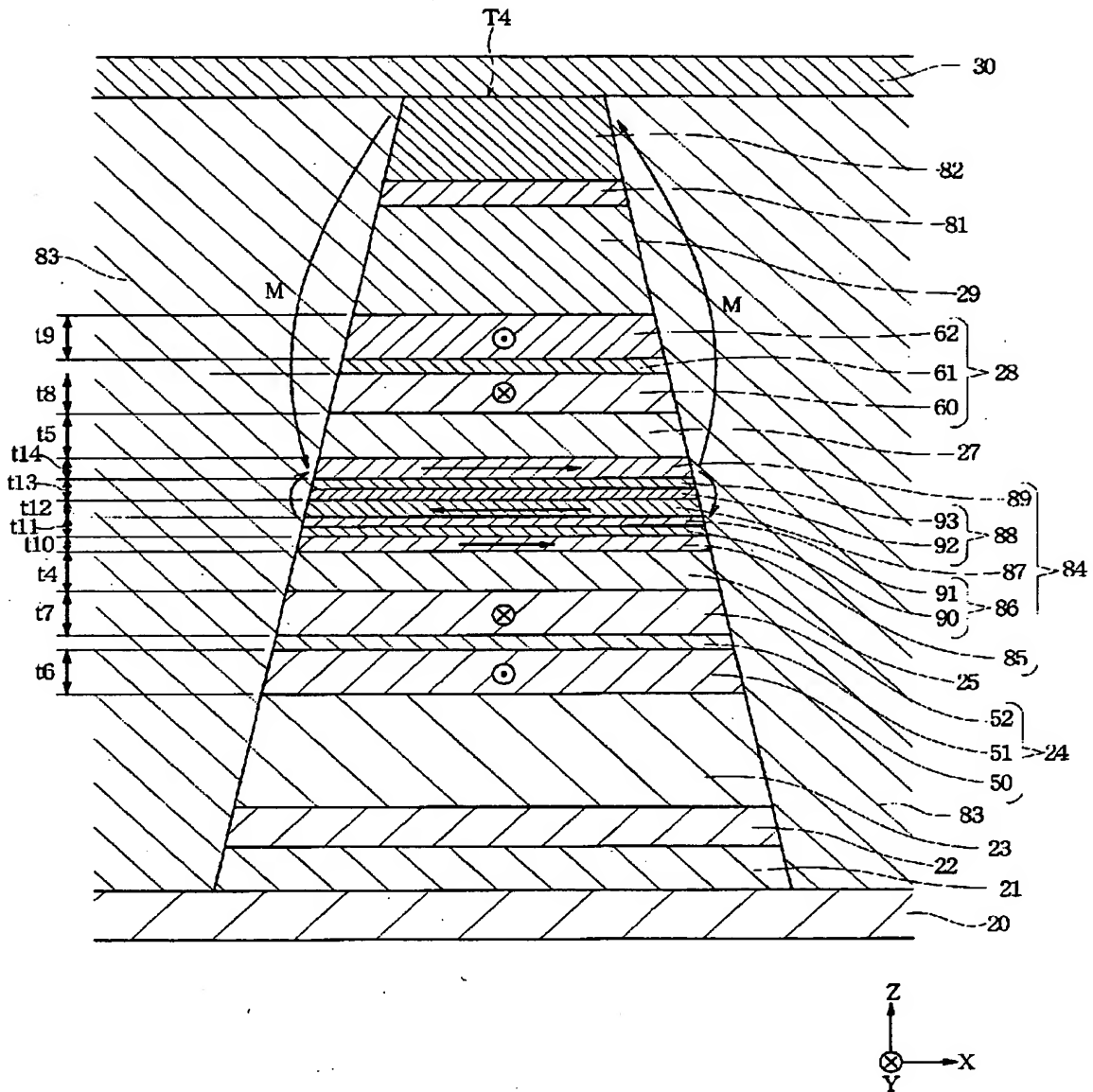
【図10】

図 10

		ケース3		ケース4	
		β	γ	β	γ
60		+		-	
27			+		-
89			+		-
88	93 	+	+	-	-
	92 				
87		-		+	+
86	91 		-		+
	90 				
85		+	+	-	-
25	75 		+		-
	74 				
52		-	-	+	+




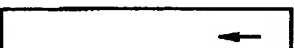
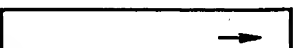
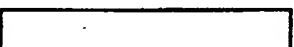
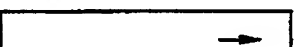
【図11】

図11



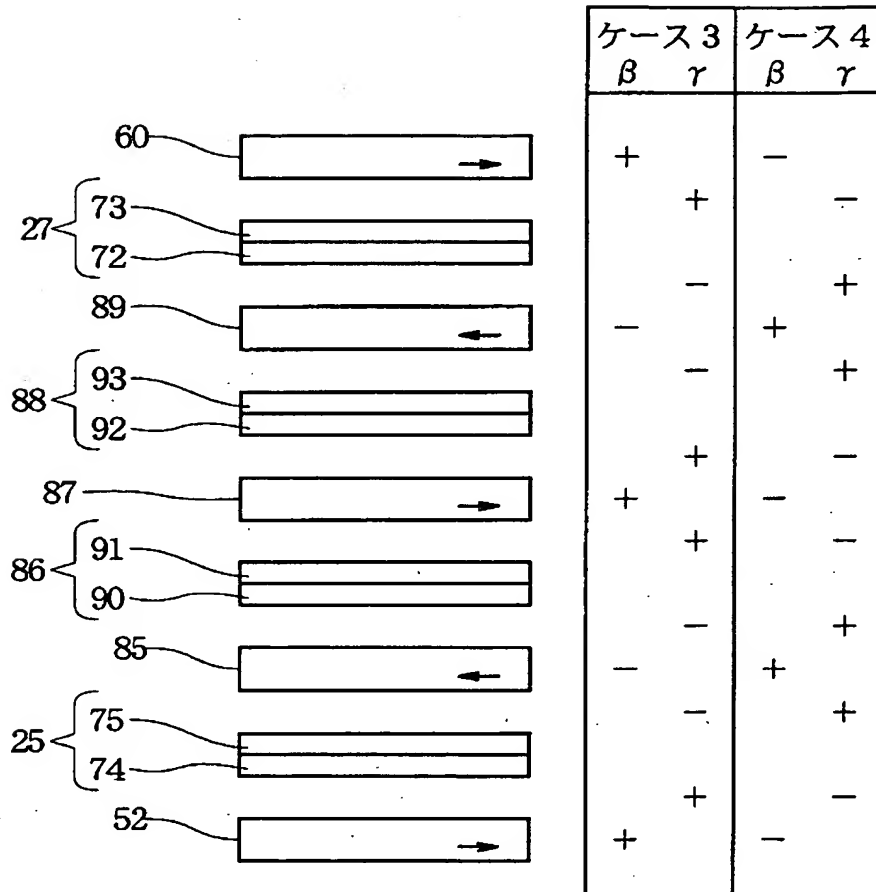
【図 12】

図 12

		ケース 1		ケース 2	
		β	γ	β	γ
60		+		-	
27			+		-
89			+		-
88 {	93	+	+	-	-
	92				
87		-	-	+	+
86 {	91		-		+
	90				
85		+	+	-	-
25			+		-
52		+	+	-	-

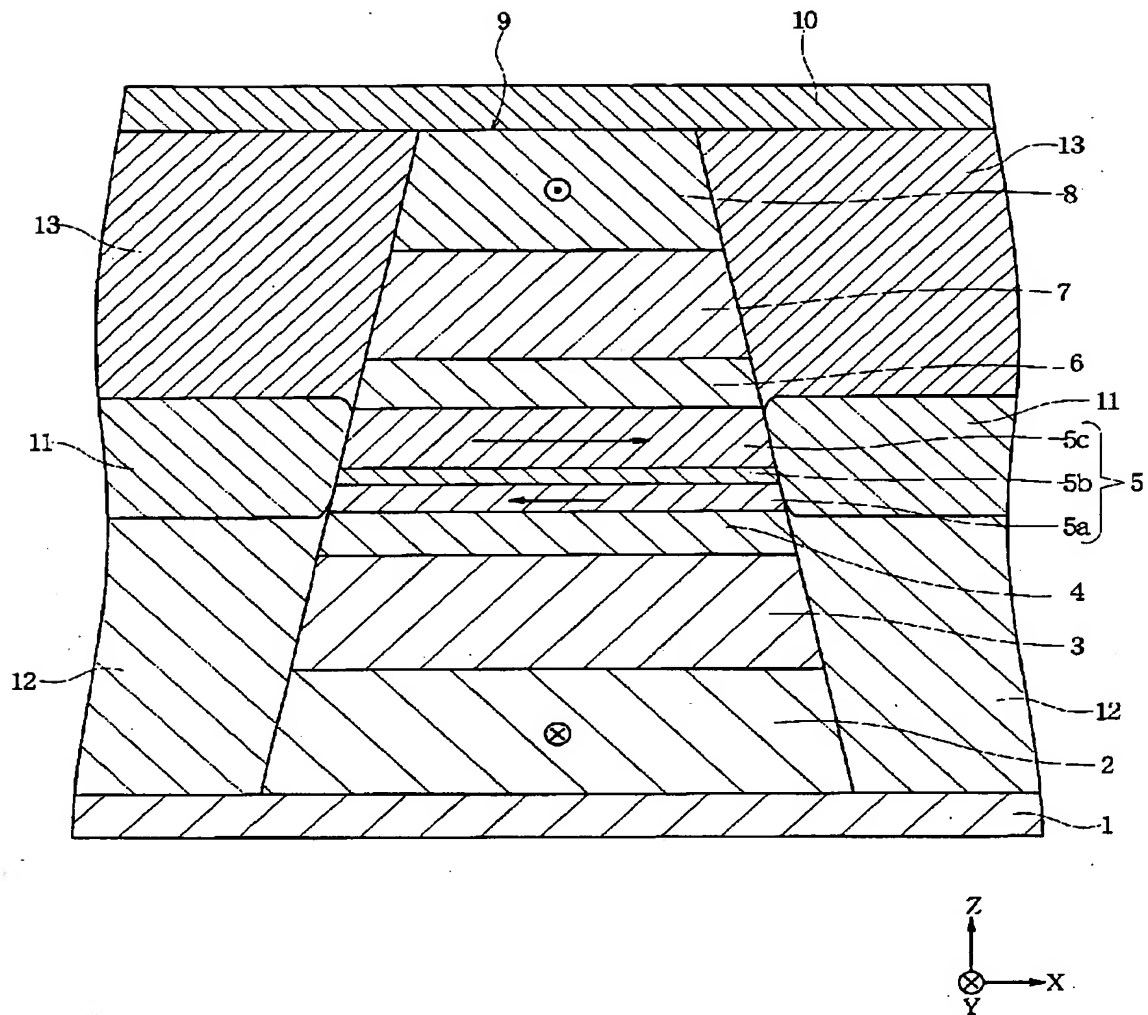
【図 13】

図 13



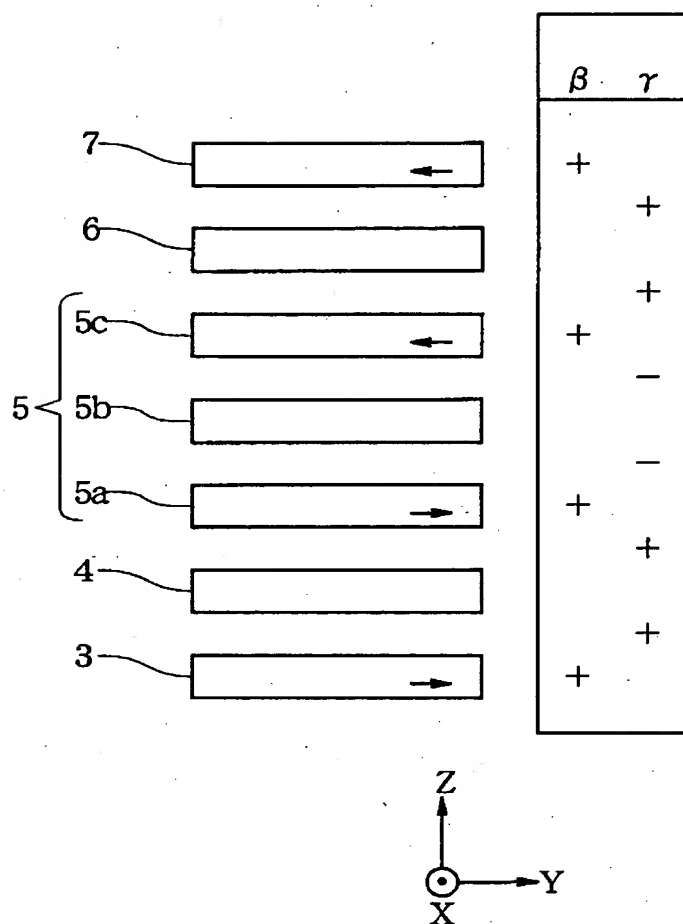
【図14】

図14



【図15】

図 15



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 $\Delta R \cdot A$ の大きなデュアルスピンバルブ型の磁気検出素子を提供する

【解決手段】 第1フリー磁性層53、第2フリー磁性層55、下部固定磁性層24及び上部固定磁性層28、それぞれを形成する磁性材料の β の正負を規定して、抵抗値が最も低くなるようにフリー磁性層26の磁化が変化したときに、全ての磁性層においてアップスピンの伝導電子に対する抵抗値をダウンスピンの伝導電子に対する抵抗値よりも小さくさせることにより、磁気検出素子の単位面積当たりの抵抗変化 $\Delta R \cdot A$ を大きくすることができる。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000010098]

1. 変更年月日 1990年 8月27日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都大田区雪谷大塚町1番7号

氏 名 アルプス電気株式会社